Produktionsplanung bei Chargenproduktion im Stahlwerk

Dissertation

zur

Erlangung des wirtschaftswissenschaftlichen Doktorgrades
der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Werner Schultz
aus Libau (Lettland)

1964

Göttingen 1965

Berichterstatter: Prof. Dr. Adolf Angermann

Mitberichterstatter: Prof. Dr. Wolfgang Lücke

Tag der mündlichen Prüfung: 10. 7. 1964

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41544314_0044

Produktionsplanung bei Chargenproduktion im Stahlwerk

Dissertation

zur

Erlangung des wirtschaftswissenschaftlichen Doktorgrades
der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Werner Schultz
aus Libau (Lettland)

Göttingen 1965

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK - LEIDEN -

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
	Einleitung	1
	Das Stahlwerk innerhalb der Organisation eines gemischten Hüttenwerkes	4
I. Teil	DER STAHLWERKSBETRIEB	7
A.	DER PRODUKTIONSBETRIEB	8
1.	Der Stahlwerksbetrieb und seine Struktur	8
2.	Der technische Ablauf der Chargenfertigung im Stahlwerksbetrieb	10
a.	Der Ofenbetrieb	10
b.	Der Gießbetrieb	13
aa.	Gießzeit	13
bb.	Standzeit	13
B.	NEBENBETRIEBE UND HILFSBETRIEBE	14
1.	Nebenbetriebe	15
2.	Hilfsbetriebe	17
3.	Vor- und nachgeschaltete Hauptbetriebe	22
II. Teil	ALLGEMEINE GRUNDLAGEN DER PRODUKTIONSPLANUNG BEI CHARGENPRODUKTION IN STAHLWERKEN	23
A.	DIE PRODUKTIONSPLANUNG	24
1.	Produktionsprogrammplanung	25
a.	Produktionsprogrammplanung im weiteren Sinn	25
b.	Produktionsprogrammplanung im engeren Sinn	26
2.	Produktionsdurchführungsplanung	27
3.	Produktionsplanung und Zuteilungsprobleme	28
4.	Produktionsplanung und Zeitplanungsprobleme	30

Seite

B. DIE BESTIMMUNGSFAKTOREN FÜR DIE PRODUKTIONSPLANUNG IN STAHLWERKEN 32

1. Die Planungsperiode 33

2. Die Auftragsverhältnisse 34

3. Das Produktionsverfahren 38

4. Die Einsatzverhältnisse - der Input 39

a. Kontinuierlicher Einsatz 40

b. Diskontinuierlicher Einsatz 43

5. Die Ausbringung der Produkte - der Output 45

6. Gegebenheiten der Produktion 50

a. Art der Produktivfaktoren 50

aa. Chargenfixe Faktoren 50

bb. Chargenvariable Faktoren 51

b. Beschränkungen 51

aa. Prozeßbedingte Beschränkungen 52

bb. Kapazitätsbedingte Beschränkungen 52

c. Organisation des Fertigungsbereiches der Produktionsstätte 57

d. Anzahl der Operationen 58

e. Arten des Materialflusses 61

f. Einfluß der Durchlaufzeit 61

7. Der Betriebsgesamtzusammenhang 66

8. Die Kosten der Produktion 69

a. Beschäftigungsfixe Produktionskosten 71

b. Chargenfixe Produktionskosten 72

c. Chargenvariable Produktionskosten 73

III. Teil MATHEMATISCHE FORMULIERUNG VON PRODUKTIONSPLANUNGSMODELLEN IN STAHLWERKEN 77

A. PRODUKTIONSPROGRAMMPLANUNGSMODELLE 78

1. Deterministische Modelle 83

a. Modelle mit unabhängigen Kostenfaktoren 92

b. Modelle mit abhängigen Kostenfaktoren 101

		Seite
2.	Stochastische Modelle	109
a.	Stochastische Bedarfsfunktion	110
b.	Stochastische Chargendauer	111
c.	Stochastische Beschränkungen	114
B.	PRODUKTIONSDURCHFÜHRUNGS-PLANUNGSMODELLE	119
1.	Die spezielle Problemstellung	119
2.	Vorhandene Ablaufplanungsmodelle und deren Anwendungsmöglichkeiten auf den Stahlwerksbetrieb	122
3.	Simulationsverfahren zur Lösung von Ablaufplanungsproblemen im Stahlwerk	123
a.	Allgemeine Grundlagen der Simulationsverfahren	125
b.	Grundsätze für das Aufstellen eines Flußdiagramms	126
C.	GESAMTMODELLE FÜR DIE PRODUKTIONSPLANUNG	130
D.	DIE VERFAHREN ZUR LÖSUNG DER ALLGEMEINEN PRODUKTIONS-PLANUNGSMODELLE	131
1.	Ganzzahlige Lineare Programmierung	133
2.	Parametrisches Lineares Programmieren	136
3.	Nichtlineare Programmierung	136
	Schluß	138
	Literaturverzeichnis	139

Einleitung

Bis in die Gegenwart hinein werden für die Probleme der Produktionsplanung ganz allgemein, speziell aber in Stahlwerken, traditionelle, auf der Empirie aufbauende Methoden angewandt. Auf die Dauer gesehen genügen aber diese Verfahren nicht mehr den Ansprüchen, welche an die qualitative Genauigkeit der Planung gestellt werden. Immer stärker kommt es darauf an, die komplexen Zusammenhänge und Verknüpfungen zu durchdringen und in einer exakten Form darzustellen. Vereinzelt sind im deutschsprachigen und amerikanischen Schrifttum [1] schon Ansätze zu finden, die durch Anwendung von Verfahren des Operations Research die Produktionsplanung in Stahlwerken richtungweisend für die künftige Entwicklung sein können. Es werden aber durchweg nur partielle Probleme beschrieben und deren Lösung angegeben. In dieser Arbeit soll versucht werden, alle bei der Produktion in Stahlwerken anfallenden Probleme der Planung systematisch zu erfassen und in Form mathematischer Modelle einer genauen Lösung zugänglich zu machen.

Wie später noch dargestellt wird, gehören alle bisher technisch durchgeführten Stahlherstellungsverfahren

---

1) vgl. Wartmann, R., Kopineck, H.J. und Hanisch, W., "Funktionelles Arbeiten in Kostenrechnung und Planung mit Hilfe von Matrizen", Archiv für das Eisenhüttenwesen, Jg. 31, 1960, S. 441 ff. - Steffen, M. und Steinecke, V., "Einflußgrößenrechnung zur Kostenplanung eines kontinuierlichen Feinstahlwalzwerkes mit Matrizen", Stahl und Eisen, Jg. 82, 1962, S. 155 ff. - Fabian, T., "A Linear Programming Model of Integrated Iron and Steel Production", Managemant Science, Vol. 4, 1958, S. 415ff. - Tocher, K.D., "An Integrated Project for the Design and Appraisal of Mechanized Decision-Making Control Systems", Operational Research Quarterly, Vol. 11, 1960, S. 50 ff.

zum Produktionstyp der Chargenfertigung. Aus diesem Grunde sind die dargestellten Modellansätze grundsätzlich für jeden Fall der Chargenproduktion anwendbar. Diese allgemeinen Bedingungen sollen im Folgenden am Modell des Stahlwerksbetriebes konkretisiert werden. Auch dabei werden wir uns recht allgemein fassen müssen, da die Fülle der Erscheinungen eine Bearbeitung jedes Einzelfalles ausschließt. Denn im Grunde stellt jedes bestehende Stahlwerk eine Individualität dar, so daß bei Produktionsplanungen in der Praxis jeder Betrieb gesondert betrachtet werden muß. Wir können nur versuchen, die typischen Merkmale herauszuarbeiten. "Rezepte" für jeden konkreten Fall zu geben ist dagegen nicht möglich. Bei der Bildung dieser Modelle soll nicht auf praktisch vorhandene Stahlwerke zurückgegriffen werden. Hier werden Modellbetriebe konstruiert mit typischen Merkmalen, an denen dann die mathematischen Verfahren erläutert werden. Es kommt dabei darauf an, diese Modelle so weit dem praktischen Fall anzunähern, daß es möglich ist, " ... durch die Anwendung wissenschaftlicher Methoden, Verfahren und Hilfsmittel auf Probleme, betreffend die Arbeitsweise von Systemen mit dem Ziele, den für diese Arbeitsweise Verantwortlichen optimale Lösungen für diese Probleme zu liefern " [1]. Diese allgemeine Arbeitsdefinition charakterisiert alle in dieser Arbeit anzuwendenden Verfahren, die sich unter dem Oberbegriff Operations Research zusammenfassen lassen. Aufgabenstellung und Ziel von Operations Research

1) Churchman, C.W., Ackoff, R.L. und Arnoff, E.L., Introduction to Operations Research, New York, 1957. Wir beziehen uns im Folgenden auf die deutsche Übersetzung, die unter dem Titel: Operations Research, Eine Einführung in die Unternehmungsplanung, Wien - München 1961 erschienen ist. S. 18.

sollen dabei als bekannt vorausgesetzt werden [1].

Es soll aber nicht unterlassen werden, hier vor einer Überschätzung zu warnen. Wir möchten dazu die von Drucker formulierte Warnung wiederholen, die vor allem darauf hinweist, daß immer das Ganze eines Unternehmens, wenn nicht gar noch weitere gesamtvolkswirtschaftliche Zusammenhänge, mit in die Überlegungen einbezogen werden müssen: " ... Auch die neuen Werkzeuge sind nicht ohne Gefahren. Werden sie nicht richtig angewendet, so können sie sogar in Richtung auf eine falsche Entscheidung wirken. Gerade weil sie eine konkrete und ins einzelne gehende Analyse des Problems ermöglichen, das bisher nur in groben Umrissen festgestellt oder erfühlt werden konnte, können die neuen Werkzeuge dazu mißbraucht werden, die Probleme eines kleinen Bereiches oder einer einzelnen Funktion zu 'lösen' auf Kosten der übrigen oder des Unternehmensganzen. Sie können mißbraucht werden, wie der Techniker sagt, 'to sub-optimize' ..." [2]. Es ist beispielsweise unsinnig, die Produktion unter rein technischen Gesichtspunkten optimal zu gestalten, wenn nicht gleichzeitig die entsprechenden Beschaffungs- oder Absatzmöglichkeiten vorliegen [3].

---

1) Trefethen, F.N., "A History of Operations Research", in: McCloskey, J.M. und Trefethen, F.N. (eds.), Operations Research for Management, Baltimore 1954. - Churchman, C.W. et al., a.a.O., S. 14. - Sagoroff, S., Operations Research, in: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Band 8, S. 96 ff. - Ackoff, R.L., "The Development of Operations Research as a Science", Operations Research, Vol. 4, 1956., S. 265 ff.- Paulssson Frenckner, T., "Betriebswirtschaftslehre und Verfahrensforschung", Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, N.F. Jg. 9, 1957, S. 65 ff. - Beckmann, M.J., Über einige Methoden des Operations Research", Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft, Jg. 114, 1958, S. 398 ff. - RKW-Auslandsdienst, Ablauf- und Planungsforschung - Operations Research, Heft 56, München 1958, S. 14 ff.

2) Drucker, P.F., Die Praxis des Management, Düsseldorf 1956, S. 439. - vgl. dazu auch Teil III, C.

3) Bierfelder, W., Wege und Irrwege mathematischen Denkens in Wirtschaftstheorie und Unternehmenspolitik, in: Marktwirtschaft und Verbrauch, Band 8, Nürnberg 1958, S. 65 ff.

Das Stahlwerk innerhalb der Organisation eines gemischten Hüttenwerkes

Im Normalfall ist das Stahlwerk nicht ein isolierter Betrieb, sondern ist Teil eines gemischten Hüttenwerkes. Hieraus ergeben sich für die Produktionsplanung wesentliche Gesichtspunkte, so daß kurz auf die Organisation eines Hüttenwerkes eingegangen werden muß.

In einem gemischten Hüttenwerk treten in der Regel folgende Hauptabteilungen auf:

1. Kokerei
2. Hochofenanlage
3. Stahlwerke
4. Warmwalzwerk
5. Kaltwalzwerk .

Diesen technischen Hauptbetrieben stehen untergeordnete Nebenbetriebe oder organisatorisch selbständige Hilfsbetriebe zur Seite. Hierzu gehören alle Betriebesteile, die für das Transportwesen, die Energieversorgung, die Wasserwirtschaft und dergleichen zu sorgen haben. Aus der technischen Sicht sind auch die kaufmännischen Bereiche Hilfs- und Nebenbetriebe, wie die Kalkulationsabteilung, die Rechnungsprüfung und die Arbeitsvorbereitung.

In den technischen Hauptbetrieben findet ein Transformationsprozeß statt, der zum Teil chemischer, zum Teil physikalischer Art ist. Diese beiden Umwandlungsformen laufen nebeneinander her, doch kann in der Regel einem von beiden der Vorrang zuerkannt werden, so der chemischen Umwandlung in der Kokerei, im Hochofen und im Stahlwerk, während die Walzwerke die vorhandenen Halbfabrikate im wesentlichen physikalisch-mechanisch verändern. Diese Unterschiede sind für die Produktionsplanung jedoch nur von sekundärer Bedeutung.

Durch sämtliche Hauptbetriebe eines gemischten Hüttenwerkes findet ein teils kontinuierlicher, teils diskontinuierlicher Materialfluß statt, wobei die gesamte erzeugte Produktionsmenge oder nur ein Teil davon in der nachfolgenden Produktionsstufe weiterverarbeitet werden. Andererseits werden in jedem Betriebsteil neue Produktionsmittel in den Prozeß eingeführt, die aus verschiedenen Quellen stammen können: aus Fremdbetrieben, Abfallprodukte anderer Haupt- oder Nebenbetriebe, z.B. Einsatz von Rücklaufschrott im Stahlwerk, oder Nebenprodukte anderer Betriebsteile, z.B. Heizung der Tieföfen des Walzwerks mit Gichtgas des Hochofens. Dadurch ergibt sich ein technischer und wirtschaftlicher Zusammenhang aller Betriebsteile, der direkt oder indirekt sein kann, in irgendeiner Form aber regelmäßig besteht.

In dieser Arbeit soll speziell auf den Stahlwerksbetrieb abgestellt werden. Der Zusammenhang zur Vorstufe des Hochofens ist durch die Einsatzbedingungen gegeben. Neben Schrott aus Fremdbezügen wird festes oder/und flüssiges Roheisen, dem Hauptprodukt des Hochofens, eingesetzt. Der abgegossene Stahlblock wird an das Warmwalzwerk weitergegeben zur Verarbeitung, von da aus geht das fertige Endprodukt (Bleche, Profile usw.) direkt zum Versand oder zum Kaltwalzwerk zur Weiterverarbeitung. Von den Walzwerksbetrieben wird wiederum Schrott an das Stahlwerk geliefert, so daß ein Rücklaufprozeß stattfindet. Diese Beziehungen sind noch relativ einfach und übersichtlich. Eine Komplizierung tritt auf, wenn die Neben- und Hilfsbetriebe betrachtet werden, deren Abgrenzung zum Teil keine technische, sondern eine organisatorische Aufgabe ist. Diese Fragen werden in einem anderen Zusammenhang noch eingehender zu behandeln sein.

Nach diesen Vorüberlegungen wird in einem I. Teil der Stahlwerksbetrieb beschrieben werden, so weit sich für die Produktionsplanung relevante Beziehungen ergeben. Dabei kann im Rahmen dieser Arbeit nicht auf spezifisch technische Einzelheiten der verschiedenen Stahlherstellungsverfahren eingegangen werden. Diese werden nur so weit behandelt, wie sich daraus unterschiedliche Voraussetzungen für die der Produktionsplanung zugrundeliegenden Daten ergeben.

In einem II. Teil werden allgemeine Grundlagen der Produktionsplanung dargestellt mit Rücksicht auf die speziellen Probleme des Stahlwerks. Nach einer allgemeinen Beschreibung der Produktionsplanung werden die Faktoren definiert und ausführlich beschrieben, welche die Planung des Produktionsprogrammes und des Produktionsablaufes beeinflussen. In einem darauf aufbauenden III. Teil werden dann entsprechende Produktionsplanungsmodelle mathematisch formuliert und Hinweise auf Wege für deren Lösung gegeben, ohne daß dabei auf Einzelheiten der Verfahren eingegangen werden soll.

I. Teil DER STAHLWERKSBETRIEB

In der Eisenhüttentechnik kennt man mehrere Herstellungsverfahren für Stahl, deren einzelne Formen noch variierbar sind, wobei diese Variationen den technischen Vorgang betreffen, sich aber für die Produktionsplanung auf einige wenige wesentliche Formen reduzieren lassen. Eine vollständige Klassifikation aller bestehenden Verfahren soll deshalb nicht vorgenommen werden, da es hier nur auf die wirtschaftlich relevanten Unterschiede ankommt. Die Herstellungsverfahren sind [1]:

1. Windfrischverfahren
   a. Bessemerverfahren für phosphorarmes Roheisen
   b. Thomasverfahren für phosphorreiches Roheisen
   c. Sauerstoffaufblasverfahren, auch Linz-Donawitz (L-D)-Verfahren genannt

2. Herdfrischverfahren
   Siemens-Martin-Verfahren
   a. Roheisen-Schrott-Verfahren
   b. Schrotteinschmelzverfahren
   c. Roheisen-Erz-Verfahren
   d. Schrott-Erz-Verfahren

3. Elektrostahlverfahren

4. Sonderverfahren.

Es ist nicht Aufgabe dieser Arbeit, die technischen Einzelheiten der Verfahren systematisch herauszustellen. So weit dies erforderlich ist, wird es an entsprechender Stelle getan werden.

---

1) Eichel, K., Das basische Windfrischverfahren, Berlin 1952. - Trubin, K.G., Der Siemens-Martin-Prozeß, Moskau 1951, deutsche Übersetzung: Berlin 1953, S. 145 ff.

A. DER PRODUKTIONSBETRIEB

Der Produktionsbetrieb soll hier verstanden werden als diejenige Kombination von technischen Elementen, die im Zentrum des Stahlherstellungsprozesses steht, also ohne die später zu definierenden Neben- und Hilfsbetriebe. Einer solchen Abgrenzung liegt in dieser Arbeit die Absicht zugrunde, möglichst einfache und allgemeine Verhältnisse darzustellen. Eine technische oder wirtschaftliche Notwendigkeit hierfür ist nicht gegeben.

1. Der Stahlwerksbetrieb und seine Struktur

Der Produktionsbetrieb besteht im wesentlichen aus zwei Elementen, dem Schmelzaggregat und dem Gießaggregat.

Das Schmelzaggregat, auch als Stahlwerksofen bezeichnet, kann ein Konverter sein, das ist ein birnenförmiger ("Thomasbirne") bis zylindrischer Hohlkörper, der im Betrieb aufrecht steht, aber kippbar ausgelegt ist. Im Siemens-Martin-Stahlwerk ist der Ofen ein sogenannter Herd, das ist ein flacher, etwa schüsselförmiger Raum, der feststehend oder kippbar sein kann.

Auf die Kapazität der Ofenanlage müssen in einem Stahlwerk alle anderen Betriebseinrichtungen dimensionsmässig abgestimmt sein. Jeder Ofen hat eine technische Maximalkapazität, die nicht überschritten werden kann. Die Leistung eines Ofens, gemessen in Tonnen pro Stunde (t/h), ist eine von verschiedenen, oft vielen, technischen Daten abhängige Größe, welche auf die Wirtschaftlichkeit [1] von außerordentlichem Einfluß ist.

---

1) Der Begriff "Wirtschaftlichkeit" wird in der Literatur unterschiedlich definiert. Wir wollen hier aber sagen, daß Wirtschaftlichkeit bedeutet, "... mit gegebenen Mitteln ein Maximum an Erfolg (Gewinnmaximierung, Kostenminimierung) zu erzielen ...". Zum Wirtschaftlichkeitsbegriff vgl. Castan, E., "Wirtschaftlichkeit und Wirtschaftlichkeitsrechnung", in:Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, Band 4, Spalte 6366 ff. Dort finden sich umfassende Lite-

Zum Ofen als dem Schmelzaggregat gehören auch die direkt darauf abgestellten Transporteinrichtungen, die den Einsatz der verschiedenen Werkstoffe in den Ofen vornehmen. Das ist einmal die sogenannte Chargiermaschine, ein meist auf Schienen laufender, oftmals drehbarer Spezialkran, der den Einsatz der festen Werkstoffe in den Ofen besorgt. Daneben gibt es den Chargierkran, welcher die Roheisenpfanne, wie sie vom Hochofen angeliefert wird, transportiert und das darin enthaltene Roheisen in den Ofen einsetzt. Außerdem übernimmt dieser Kran andere auf der Ofenbühne erforderliche Transportarbeiten, er ist also vielseitiger verwendbar als die Chargiermaschine. In der Regel findet man im Siemens-Martin-Stahlwerk beide Elemente, im Thomasstahlwerk nur den Chargierkran, da hier überwiegend flüssiger Rohstoff eingesetzt wird.

Dadurch, daß eine räumliche Trennung von Schmelzaggregat und Gießaggregat wegen der sonst zu starken Abkühlung aus technischen Gründen nur unter sehr erschwerenden Bedingungen, praktisch aber gar nicht möglich ist, ist es berechtigt, das Gießaggregat zum Produktionsbetrieb zu rechnen. Eine Zuordnung als Nebenbetrieb wäre wegen des engen Zusammenhanges zum Schmelzbetrieb nicht gerechtfertigt.

Das Gießaggregat besteht aus Gießkran und Gießbühne bzw. Gießgrube. Nach dem "Abstich" der fertigen Schmelze wird der flüssige Stahl von einer Stahlpfanne aufgenommen. Der Gießkran transportiert dann das Gefäß zur Gießbühne bzw. Gießgrube, wo der Stahl in bereitstehende Formen, sogenannte Kokillen, abgegossen wird. Diese Kokillen stehen entweder direkt auf dem Hüttenflur oder in einer Vertiefung (Gießgrube). Die Kokillen können sich aber auch auf transportablen Wagen befinden. Das sind jedoch für die Produktionsplanung irrelevante technische Einzelheiten.

2. Der technische Ablauf der Chargenfertigung im Stahlwerksbetrieb

Es können in diesem Abschnitt nur grundlegende charakteristische Merkmale für die Technik der Stahlherstellung herausgearbeitet werden, soweit sich daraus das Zustandekommen der Daten für die Produktionsplanung erklären lassen. Darüber hinaus wird der Variationsbereich derjenigen Planungsdaten angegeben, welche für die jeweiligen Modelle typisch sind. Die für die zu bildenden Betriebsmodelle spezifischen technischen Angaben werden an der entsprechenden Stelle ausgeführt.

a. Der Ofenbetrieb

Alle bisher bekannten technisch durchführbaren Stahlherstellungsverfahren gehören zum Typ der Chargenfertigung [1], d.h. eine bestimmte Rohstoffmenge wird auf mindestens einer Stufe als Ganzes des Produktionsbedingungen unterworfen und als Ganzes dem Prozeß entnommen.

Im Zentrum des gesamten Stahlerschmelzungsprozesses steht das eigentliche Ofenelement. Jeder Ofen hat eine bestimmte Kapazität [2] in bezug auf die mögliche

---

1) Zum Begriff "Charge" vgl. Riebel, P., "Kostengestaltung bei chargenweiser Produktion", in: C.E. Schulz (Hrsg.), Der Industriebetrieb und sein Rechnungswesen, Wiesbaden 1956, S. 138. - Mellerowicz, K., Kosten und Kostenrechnung, Band I, Theorie der Kosten, 3. Auflage, Berlin 1957, S. 158 ff. - Riedelbauch, H., "Partie- und Chargenfertigung in betriebwirtschaftlicher Sicht", Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, N.F. Jg. 9, 1957, S. 535 ff., besonders S. 543: "Chargenfertigung ist überall dort gegeben, wo eine abgegrenzte Rohstoffmenge als solche eine bestimmte Produktionsstufe bis zu gleichzeitiger Fertigstellung durchläuft und dabei auf Grund der Prozeßbedingungen dieser Stufe Eigenschaften erwirbt, die, ungeachtet der Vorgänge auf nachfolgenden Produktionsstufen, bis zum völligen Abschluß des Produktionsprozesses erhalten bleiben ...".

2) Die so definierte Kapazität ist identisch mit der maximalen Chargengröße.

Einsatz- bzw- Ausbringungsmenge und auf die Leistung [1]. Auf diese Kapazität hin müssen alle anderen Betriebselemente abgestimmt werden, unter Berücksichtigung der Normalbeanspruchung.

Die eingebrachten Rohstoffe, flüssiges oder festes Roheisen und in bezug auf Raumgewicht und Analyse unterschiedliche Schrottsorten, werden einem Transformationsprozeß unterworfen, wobei im Stahl unerwünschte chemische Begleitelemente entfernt werden, bis die gewünschte Endanalyse erreicht ist. Da die Eigenschaften des Stahls in chemischer, physikalischer und technologischer Beziehung weitgehend von der chemischen Zusammensetzung des Materials abhängig sind, ist hiermit ein eindeutiges Kriterium gegeben für die Qualität des Stahls. Es soll damit nicht gesagt werden, daß dies die einzige Einflußgröße auf die Stahlqualität bildet. Daneben sind auch die Gießtechnik und die Vorgänge beim 'erwalzen entscheidend, doch ist die Stahlanalyse für alle folgenden Vorg änge ein wesentlicher und ein unveränderbares Datum darstellender Faktor.

Die Zeitdauer für eine Charge schwankt in sehr weiten Grenzen. Untergrenze sind etwa 15 bis 20 Minuten bei kleinen Thomaskonvertern (25 bis 30 t), Obergrenze rund 12 Stunden bei großen Siemens-Martin-Öfen.

---

1) Als Leistungsmaßstab kann hier, für ein gegebenes Produkt, die pro Zeiteinheit ausgebrachte Produktmenge bei variablen Einsatzfaktoren, oder, bei jeweils gleichen Einsatzfaktoren, der Zeitbedarf pro Charge definiert werden. Sollen unterschiedliche Produkte auf einen gemeinsamen Leistungsbegriff bezogen werden, so ist dafür die Stunden-Soll-'ergleichstonne flüssiger Ausbringung eingeführt (Vgl. hierzu: Ballenlit, W., "Plankosten im Stahlwerk", Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 24, 1954, S. 339.

2) Die größten Ofeneinheiten in Deutschland haben ein Fassungsvermögen von rund 300 t, doch sind in den USA und in der UdSSR schon Einheiten bis zu 450 t mit Erfolg im Betrieb.

Die technischen Unterschiede der erwähnten Stahlherstellungsverfahren sind nicht zu übersehen, sowohl in bezug auf den Ablauf des Verfahrens als auch auf die Qualität der erzeugten Produkte. Es variieren die Einsatzverhältnisse, das Verhältnis von festem zu flüssigem Einsatz, die Arten der benötigten Brennstoffe und Energieformen. In jedem Fall sind es aber eisenhaltige Einsatzrohstoffe oder Brennstoffe mit spezifischem Wärmeinhalt, die eingesetzt werden. In jedem Fall sind es Rohstahlblöcke, die ausgebracht werden. Deshalb können alle Stahlerschmelzungsverfahren auf einen allgemeinen Fall reduziert werden. Hier soll als typisch der Siemens-Martin-Prozeß dargestellt werden, weil dabei die besten Voraussetzungen für die Bildung von Modellen erfüllt werden. Soweit nicht gesondert darauf hingewiesen wird, werden im Folgenden alle anderen Verfahren als Sonderfälle des Siemens-Martin-Verfahrens betrachtet werden. [1)]

Nachdem die gewünschte Endanalyse der Stahlcharge erreicht ist, wird der Ofen abgestochen, d.h. die Charge wird nach Öffnung des Ofens in eine Stahlpfanne entleert. Sobald der Abstich beendet ist beginnt der Einsatz einer neuen Charge, falls keine Reparaturen der Ofenausmauerung bzw. des Herdes vorgenommen werden müssen.

---

1) Ebenso verfährt Fabian, T., a.a.O., S. 421: " ...while the open hearth process (Siemens-Martin-Prozeß) uses both hot metal and steel scrap for input, the bessemer process uses hot metal only, and the ferrous input of the electric furnaces is steel scrap. The two processes are quite different from each other and from the open hearth process, yet, because of the ferrous inputs used, it will be convenient to look ar them as special cases for the open hearth process ... ".

b. Der Gießbetrieb

Die abgestochene Charge wird vom Gießkran zu den bereitstehenden Kokillen transportiert und in diesen vergossen. Die verschiedenen möglichen Gießverfahren sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Wichtig für die Produktionsplanung ist aber die Zeitabhängigkeit des Gießvorganges. Unterschiedliche Stahlwerksprodukte haben nicht nur jeweils verschiedene Chargendauer während des Schmelzprozesses, sondern auch die Gießzeiten und die Standzeiten in der Kokille sind produktabhängig.

aa. Gießzeit

Aus metallurgischen und technologischen Gründen müssen für verschiedene Stahlwerksqualitäten unterschiedliche Gießgeschwindigkeiten vorgeschrieben werden. Die Oberflächenbeschaffenheit der abgegossenen Stahlblöcke ist weitgehend eine Funktion der Gießgeschwindigkeit, gemessen in (t/min) oder auch, bei gleichem Kokillenformat, in (m/min). Diese letztere Größe wird auch als Steiggeschwindigkeit bezeichnet. Zu schnelles Gießen führt leicht zur sogenannten Schalenbildung, zu langsames Vergießen begünstigt die Rißanfälligkeit der Blöcke. Das soll hier nur eine grobe und beispielhafte Charakterisierung der tatsächlichen Verhältnisse darstellen, wobei die Zusammenhänge in der Praxis weit komplizierter und von Werk zu Werk unterschiedlich sind. Jede Qualitätsüberwachungsstelle in einem Hüttenwerk wird aber auf Grund von speziellen Untersuchungen für alle möglichen Qualitäten genaue Gießanweisungen herausgeben. Diese vorgeschriebenen Gießzeiten stellen dann für die Produktionsdurchführungsplanung Daten dar.

bb. Die Standzeit

Nach dem Abgießen der Blöcke müssen diese eine bestimmte Zeit in der Kokille stehen bleiben. In dieser Zeit

erstarrt der flüssige Stahl, es bildet sich eine feste Außenschicht, vom Hüttenmann als "Speckschicht" bezeichnet. Werden die Blöcke zu früh den atmosphärischen Einflüssen ausgesetzt, kann es zu Störungen im ineren Blockgefüge und in der Folge zu schwerwiegenden Materialfehlern beim Walzgut kommen. Zu frühes Strippen der Kokillen erhöht die Rißanfälligkeit. Bleiben andererseits die Stahlblöcke zu lange in der Kokille wird das Strippen der Kokillen unter Umständen erheblich erschwert, es können mechanisch verursachte Oberflächenrisse auftreten. Zudem bedeutet das einen unnötigen Wärmeverlust. Auch hier gilt es wieder, unter technologischen, metallurgischen und wärmetechnischen Gesichtspunkten ein totales Optimum für die Standzeiten jeder einzelnen Qualität und Kokillenart herauszufinden und diese Werte der Planung zugrunde zu legen.

B. NEBENBETRIEBE UND HILFSBETRIEBE

Das Unterscheidungskriterium für Nebenbetriebe und Hilfsbetriebe soll hier der organisatorische Zusammenhang zum jeweiligen Hauptbetrieb sein, nicht die Art der Leistungserstellung [1]. So sind Nebenbetriebe hier verstanden als solche Betriebsteile, die verwaltungsmäßig dem Hauptbetrieb unterstehen. Entsprechend werden als Hilfsbetriebe solche Betriebsteile angesprochen, die wohl mit dem Hauptbetrieb ent zusammenarbeiten und Leistungen technischer oder wirtschaftlicher Art austauschen, die aber eine eigene Verwaltung besitzen. In diesem Sinn sind auch die vor- und nachgeschalteten Hauptbetriebe, für das Stahlwerk also Hochofen bzw.

1) Mellerowicz, K., Kosten und Kostenrechnung, Band I, Theorie der Kosten, 2. Auflage, Berlin 1951, S. 227 ff.

Warmwalzwerk, Hilfsbetriebe, da sie eine eigene Verwaltung haben. Die Unterscheidung zwischen den eigentlichen Hilfsbetrieben im Sinne von Mellerowicz [1] und den vor- und nachgeschalteten Hauptbetrieben liegt in der Art der Aufgabenerfüllung. Während der Hauptbetrieb den wesentlichen Teil seiner Produktionsmittel von einem anderen Hauptbetrieb übernimmt und an einen anderen Hauptbetrieb oder den Verkauf direkt weitergibt, arbeitet der Hilfsbetrieb für alle anderen Teilbereiche gleichzeitig. Ein besonders sinnfälliges Beispiel für einen solchen Hilfsbetrieb stellt die zentrale Elektroreparaturwerkstatt oder ein zentrales Kraftwerk dar.

1. Nebenbetriebe

Die Nebenbetriebe des Stahlwerks sind in den verschiedenen praktisch auftretenden Werken unterschiedlich organisiert, doch läßt sich eine allgemeine Zuordnung, die ganz generell Geltung hat, trotzdem machen, da hier nicht auf praktisch vorhandene Werke sondern auf Modellbetriebe abgestellt wird.

Die Nebenbetriebe des Stahlwerkshaben teilweise Lagerfunktionen auszuüben. Im wesentlichen sind es jedoch technische Aufgaben, die zur Vorbereitung und zum reibungslosen Ablauf des Produktionsprozesses dienen.

Der Schrottplatz hat außer der Lager- und Sortierungsfunktion für die verschiedene Schrottsorten die Aufgabe, den vom Stahlwerk für die laufende Produktion erforderlichen Schrott nach Menge und Qualität bereitzustellen. In der Regel werden in jedem Stahlwerk verschiedene Stahlqualitäten neben- und nacheinander hergestellt,

1) Mellerowicz, K., Kosten und Kostenrechnung, 2. Auflage, a.a.O., S. 228: "Hilfsbetriebe bilden diejenigen Werksteile, die im Rahmen des Gesamtwerkes eine selbständige Leistung erbringen. Hierzu gehören vor allem die Energiebetriebe ...".

die sich durch ihre Endanalyse und damit die physikalischen und chemischen Eigenschaften unterscheiden. Dabei haben einige Qualitäten einen größeren Spielraum für die chemische Analyse und es kann hier "schlechterer" Schrott eingesetzt werden, der andererseits weniger Kosten verursacht auf Grund niedrigerer Preise, als besser aussortierter Schrott. Es kommt dabei hauptsächlich auf einige, meist unerwünschte Stahlbegleiter an, wie Schwefel, Phosphor, Kupfer, Zinn und andere, deren Entfernung entweder unmöglich ist, wie bei Zinn und Kupfer, oder nur unter teiweise erheblichem Zeitaufwand möglich ist, wie bei Schwefel und Phosphor. Diese Begleitelemente bewirken im Stahl ungünstige Eigenschaften, führen zur Versprödung, zu Rißanfälligkeit, Korrosionsanfälligkeit usw. Auf diese Dinge ist bei der Schrottbereitstellungsplanung durch den Schrottplatz besonders zu achten.

In vielen Stahlwerken, besonders in Thomasstahlwerken, ist ein sogenannter Roheisenmischer vorhanden. Dieser hat die Aufgabe, das vom Hochofen angelieferte Roheisen aufzunehmen. Dabei übernimmt der Mischer gleichzeitig zwei Funktionen. Einmal wirkt er als Lager und gleicht Schwankungen in der Produktion von Roheisen aus, zum anderen werden im Mischer Unterschiede in der Roheisenanalyse ausgeglichen.

In der Kokillenhalle werden die Lagerung, Sortierung, Vorbereitung und Bereitstellung der Kokillen vorgenommen. Es ist in kleineren Betrieben möglich, daß keine gesonderte Kokillenhalle zur Verfügungsteht, sondern ein Teil der Stahlwerkshalle oder der Gießhalle wird für die Zwecke der "Kokillenwirtschaft" benutzt. Dies ändert aber nichts an der Tatsache, daß hier ein gesonderter Betriebsteil vorliegt, der aber in jedem Fall der Stahlwerksleitung untersteht.

Ganz ähnlich liegen die Verhältnise bei der "Gießpfannenwirtschaft". Hier werden die vorhandenen Pfannen nach dem Abgießen gereinigt, eventuell ausgebessert oder völlig neu hergestellt, die Ausgußvorrichtung, die sich im Pfannenboden befindet, wird eingesetzt, die Pfanne vor der Gebrauch angewärmt, da die feuerfesten Steine bei zu großen Temperaturschwankungen zerstört würden, und die Pfannen für den folgenden Abstich bereitgestellt.

In der Stripperhalle werden die abgegossenen Stahlblöcke, nachdem sie erstarrt sind "gestrippt", d.h. von den leicht konischen Blöcken (mit quadratischem Querschnitt) oder Brammen (mit Rechtecksquerschnitt) werden durch einen Spezialkran die Kokillen abgezogen. Da nun die Blöcke [1] schneller Abkühlen, ist es angebracht, die Stripperhalle möglichst in die Nähe der Tieföfen zu verlegen, wo die Blöcke vor dem Abwalzen noch einmal aufgeheizt werden. Je weniger Wärme verloren gegangen ist, um so kürzer sind die Standzeiten im Tiefofen und um so geringer der Wärmeverbrauch, um so geringer aber auch die Kosten. Hier werden die Vorteile des sogenannten "Arbeitens in einer Hitze" deutlich.

In einigen Werken übernimmt die Stripperhalle die Aufgaben der Kokillenlagerung und Vorbereitung mit, doch ist das für diesen Teilbetrieb nicht unbedingt charakteristisch.

2. Hilfsbetriebe

Die Hilfsbetriebe stehen, wie schon gesagt, unter eigener Verwaltung. Für Sonderfälle kann aber der Stahlwerksleitung Anordnungsbefugnis übertragen werden. Es ist

1) Wir wollen im Folgenden vereinfachend nur von Blöcken sprechen und den Unterschied zwischen Block und Bramme dabei nicht gesondert erwähnen. Für diese Arbeit hat das auch keine Bedeutung.

auch möglich, daß Teile der Hilfsbetriebe in Art einer Stabsstelle direkt dem Stahlwerk unterstellt werden, z.B. eine Reparaturkolonne für mechanische oder elektrische Arbeiten, damit der Betrieb wegen kleinerer Störungen nicht warten muß, sondern solche Fehler schnell in eigener Regie beheben kann. Diese in Einzelheiten der Organisationslehre gehenden Fragen können aber im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden.

Die Hilfsbetriebe findet man auf folgenden Fünf Gebieten:

a. Energieversorgung
b. Transportwesen
c. mechanische und elektrische Reparaturen und Bauarbeiten
d. Kontrolle und Prüfung
e. Lagerwesen

zu a) Der Bereich der Energieversorgung soll hier in einem weiten Sinn verstanden werden. Er umfaßt dabei die gesamte Wärmewirtschaft, die Versorgung mit Gas und Öl zu Heizzwecken, doe Stromversorgung, die Wasserwirtschaft, die Preßluftanlagen und die Versorgung mit Sauerstoff, der für metallurgische Zwecke erforderlich ist. Im Rahmen der Organisation eines gemischten Hüttenwerkes ist es sinnvoll, alle diese Versorgungsbetriebe in zentralen Stellen zusammenzufassen, da mehr oder weniger alle Hauptbetriebe, aber auch die Neben- und Hilfsbetriebe, auf diese Energieträger angewiesen sind. Man spricht dann von einer Kraftzentrale, von zentraler Wasserversorgung usw.

zu b) Ebenso wie bei der Energieversorgung ist es sinnvoll, das Transportwesen in zentralen Abteilungen zusammenzufassen. Der schienengebundene Verkehr ist schon allein durch die enge Zusammenarbeit mit der Staatsbahn oder nicht werkseigenen Privatbahnen darauf angewiesen,

um diesen Verkehr so übersichtlich wie möglich zu gestalten, den gesamten Schienenverkehr nach Außen zentral zu planen und durchzuführen. Von da aus ist es nur ein kleiner Schritt, auch den werksinternen Schienenverkehr dieser Stelle unterzuordnen. Genauso wie beim Einsatz der Schienenfahrzeuge können auch die Straßenfahrzeuge einer zentralen Stelle untergeordnet werden. Das ist günstig, weil dadurch der Kontakt zu den Produktionsbetrieben besonders übersichtlich gestaltet werden kann, damit der häufig stoßweise und unregelmäßig anfallende Verkehr ohne große Störungen des Betriebsablaufs überwunden werden kann. Zum Transportbereich gehören ferner die gesamten Krananlagen, doch sind diese so sehr auf die einzelnen Betriebsteile eingestellt, daß hier eine selbständige Abteilung nur störend wirken würde. Das hindert natürlich nicht daran, sämtliche Krananlagen von einer oder mehreren zentralen Stellen aus reparieren und kontrollieren zu lassen. Im laufenden Betrieb gehören die Kräne aber zu den direkten Produktionselementen, und nicht zu den Hilfsbetrieben.

zu c) In fast allen Hüttenwerken, vor allem aber in den größeren, finden sich zentrale große Werkstätten für mechanische und elektrische Arbeiten. Hier werden neben den laufend anfallenden Reparaturarbeiten meist auch Entwicklungsaufgaben und Bauprojekte für den eigenen Betrieb ausgeführt. Oftmals werden zur Ausnutzung der Kapazität noch Aufträge von fremden Betrieben angenommen. Im Rahmen dieser Arbeit interessiert aber nur die Tätigkeit dieser Hilfsbetriebe, so weit sie für laufende Reparaturen in Anspruch genommen wird.Das neben den großen zentralen Werkstätten unter eigener Leitung oftmals auch noch kleinere Werkstätten zu finden sind, die den einzelnen Hauptbetrieben direkt unterstehen, wurde schon erwähnt.

Außer den elektrischen und mechanischen Werkstätten gibt es in ähnlicher Weise auch noch die Bauabteilungen als Hilfsbetriebe, die für laufende Reparaturen und Neuausführungen der Ofenmauerung usw. zuständig sind. Auch hier wird der Zusammenhang zu mehreren Hauptabteilungen wieder sichtbar, weshalb sich eine eigene Verwaltung von selbst anbietet, abgesehen von der unterschiedlichen Anforderung an die jeweils leitenden Personen in fachlicher Hinsicht.

zu d) Als das Unterscheidungsmerkmal für Kontrolle und Prüfung des Betriebsgeschehens hat die Möglichkeit des aktiven Eingreifens in grundsätzlich wiederholbare Prozesse zu gelten. Hilfsbetriebe mit Kontrollfunktion sind demnach das chemische Labor und die Versuchsanstalt mit ihren sehr differenzierten Aufgaben, die Arbeitsvorbereitung und Teile des Kalkulations- und Rechnungswesens. Prüfungsaufgaben erfüllen Abteilungen wie die Stoffwirtschaft und andere Verwaltungsbetriebe.

zu e) In jedem Hüttenwerk finden sich neben Auslieferungslagern für Fertigprodukte in den einzelnen Betrieben zentrale Lager, die auf den Bedarf des Gesamtbetriebes abgestellt sind. Solche Lager stehen unter eigener Verwaltung und haben darum die Stellung von Hilfsbetrieben.

Lagerprobleme treten im Stahlwerksbetrieb an mehreren Stellen auf, sind aber im wesentlichen beschränkt auf fremdbezogene Stoffe, Hilfsstoffe und Betriebsstoffe [1]. Keine Lagerprobleme ergeben sich in der Regel beim

1) Auf die Probleme der Lagerhaltung bei determiniertem oder stochastischem Bedarf in der Planungsperiode geht die Arbeit von Peters ein. Vgl. Peters, B., Die Bestimmung der optimalen Losgröße. Eine Anwendung der Nichtlinearen Programmierung, Dissertation, Göttingen 1961. Diese Probleme würden hier zu weit führen. Eingehende Literaturabgaben finden sich bei Peters.

Hauptprodukt in den Beziehungen zum Hochofenbetrieb und zum Warmwalzwerk. Das vom Hochofen bezogene flüssige Roheisen ist ein nur sehr begrenzt lagerfähiges Gut. Erfolgt der Einsatz des flüssigen Roheisens nicht direkt in den Stahlwerksofen sondern erst in einen Roheisenmischer, so ist das zwar ein Lagervorgang, der aber als solcher nur sekundär eine Rolle spielt. Ähnlich verhält es sich auf der Outputseite des Stahlwerks mit den abgegossenen Blöcken. Da angestrebt wird, in "einer Hitze" zu arbeiten, d.h. ein neuerliches Aufheizen der Blöcke weitgehend abzukürzen, sollen die Blöcke nach dem Strippen der Kokillen so bald als möglich, ohne weitere Abkühlung, in die Tieföfen des Walzwerks eingesetzt werden. Eine Lagerung liegt dann nicht vor, von möglichen Ausnahmen auf Grund irgendwelcher Störungen des Betriebsablaufes abgesehen.

Die wesentliche Lagerhaltungsfunktion für das Stahlwerk wird dem Schrottplatz übertragen. Hier lagert der fremdbezogene Schrott sowie der Rücklaufschrott aus dem Walzwerk. Neben dem Schrott werden für den Stahlerschmelzungsprozeß noch einige andere Rohstoffe benötigt, die je nach den Raumverhältnissen beim Schrottplatz oder in der Stahlwerkshalle gelagert werden. Hierbei handelt es sich um relativ geringe Mengen von Mangan, Silizium-, Aluminium- oder Kupferträgern, neben anderen Legierungs- und Stahlveredelungselementen wie Wolfram, Molybdän, Titan usw. Diese Materialien haben einen hohen spezifischen Wert, ausgedrückt in DM/t bzw. DM/m^3, weswegen hier besonders Sorgfalt auf die Bemessung der Lagerbestände zu verwenden ist. Der Verbrauch dieser Zusatzstoffe ist aber relativ genau vorherzusagen, sobald das Produktionsprogramm festliegt.

Das Kalk- und Dolomitlager ist meistens dem Stahlwerk direkt angegliedert. Der Kalk wird zu metallurgischen

Zwecken gebraucht, er bindet die unerwünschten Stahlbegleiter Schwefel, Phosphor, sowie Verunreinigungen als Kalziumverbindungen in der Schlacke. Dolomit wird benötigt zum Ausbessern der Öfen, unter Umständen auch zum Abdicken der Schlacke.

Win weiterer größerer Lagerposten wird gebildet durch die Brennstoffe. Auch hier kann der Bedarf für eine bestimmte Periode annähernd abgeschätzt werden, wodurch sich optimale Lagerbestände bestimmen lassen.

3. Vor- und nachgeschaltete Hauptbetriebe

Wie schon am Eingang zu diesem Kapitel gesagt unterscheiden sich die Hauptbetriebe von den Hilfsbetrieben durch die Art der Aufgabenerfüllung. Vom Stahlwerk aus gesehen gilt als vorgeschalteter Hauptbetrieb der Hochofenbetrieb, der das Roheisen anliefert. Indirekt gehört auch die Kokerei dazu, doch sind direkte Lieferungen zwischen Kokerei und Stahlwerk von sekundärer Bedeutung. Am Ende des Stahlerschmelzungsprozesses werden die Blöcke und Brammen an das Warmwalzwerk weitergegeben, dieses ist also der nachgeschaltete Hauptbetrieb. Zu diesen beiden Hauptbetrieben Hochofen und Warmwalzwerk bestehen naturgemäß besonders enge technische und wirtschaftliche Beziehungen, und auf diese wird in dieser Arbeit eingehend Rücksicht genommen werden müssen.

Wenn bei der Bildung der mathematischen Produktionsplanungsmodelle fast durchweg auf Beispiele aus dem Hauptbetrieb Stahlwerk Bezug genommen werden wird, so darf dabei nicht vergessen werden, daß auch die Kapazitäten von Neben- und Hilfsbetrieben und die Gegebenheiten dieser Betriebe bei der praktischen Durchführung von Planungsaufgaben als wesentliche Nebenbedingungen und Beschränkungen auftreten können und dies in der Regel auch tun werden.

II. Teil

ALLGEMEINE GRUNDLAGEN DER PRODUKTIONSPLANUNG BEI CHARGENPRODUKTION IN STAHLWERKEN

Entsprechend den Funktionen eines Betriebes können mehrere gesamtbetriebliche Planungsaufgaben unterschieden werden [1]:

a. Beschaffungsplan
b. Lagerplan
c. Produktionsplan
d. Absatzplan
e. Finanzplan und Investitionsplan.

Je nach der speziellen Art des betrachteten Betriebes stehen besondere Planungsaufgaben im Vordergrund, während die anderen in ihrer Bedeutung dahiner zurückstehen. Produktionsbetriebe [2] können dabei

a. absatzorientiert
b. auftragsorientiert

sein [3]. Bei absatz- oder marktorientierten Betrieben stehen die Lagerplanung, die Beschaffungsplanung und vor allem die Absatzplanung im Vordergrund. Demgegenüber ist bei auftragsorientierten Betrieben der Produktionsplan im Mittelpunkt der Überlegungen. Dabei werden auch Absatzplanungen vorgenommen, die aber bei kurzfristiger Planung relativ unbedeutend sind, weil in diesem Fall die Aufträge bereits erteilt sind, bevor die Produktion oder überhaupt die Planung der Produktion in Angriff genommen wird. Das entscheidende Plan-

1) Mellerowicz, K., Planung und Plankostenrechnung, 1. Band, Freiburg 1961, S. 122. - Gutenberg, E., "Planung im Betrieb", Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 22, 1952, S. 672. - Beste, Th., "Der Stand der betriebswirtschaftlichen Planung", Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, Jg. 36, 1942, S. 117 ff. und S. 176 ff. - Koch, H., "Betriebliche Planung", in: Die Wirtschaftswissenschaften, Wiesbaden 1961, S. 29 ff.

2) Produktion soll hierbei als Gegensatz zu Dienstleistungen und Verwaltungsaufgaben verstanden werden.

3) Gutenberg, E., Grundlagen der Betriebswirtschaftsleh-

datum sind dabei die Auftragsbestände. Da gemischte Hüttenwerke, als deren Teilbetriebe die Stahlwerke anzusehen sind, typisch auftragsorientiert sind, wollen wir uns in dieser Arbeit im Wesentlichen auf die Produktionsplanung beschränken und dabei Lagerhaltungs- und Absatzprobleme zurücktreten lassen. Je langfristiger der Produktionsplan sein soll, um so mehr werden die Absatzplanungsprobleme an Bedeutung gewinnen [1].

A. DIE PRODUKTIONSPLANUNG

Die Produktionsplanung soll Antwort geben auf die Fragen, welche Produkte in welchen Mengen hergestellt werden sollen. Daneben werden das anzuwendende Produktionsverfahren, die benötigten Aggregate und die Reihenfolge, in welcher die Produkte erzeugt werden, festgelegt [2]. Bei praktischer Durchführung der Planung können einige dieser Fragen simultan gelöst werden, so daß zwei große Komplexe übrig bleiben [3]:

1. Produktionsprogrammplanung
   (Was? Wieviel? Wie?)
2. Produktionsdurchführungsplanung
   (Wo? Wann?)

In der anglo-amerikanischen Literatur wird unterschieden zwischen Production planning und Production scheduling [4]. " ... the manager wishes to maximize profit expectations and he attempts to do so through two

1) Vgl. Gutenberg, E., Grundlagen ..., a.a.O., S. 131.

2) Vgl. Mellerowicz, K., Planung und Plankostenrechnung, a.a.O., S. 270. - Alford, L.P. und Bangs, J.R. (eds.), Production Handbook, New York 1954, S. 69. - Salveson, M.E., "On a Quantitative Method on Production Planning and Scheduling", Econometrica, Vol. 20, 1952, S. 560.

3) Vgl. Gutenberg, E., Grundlagen ..., a.a.O., S. 123 ff.- Mellerowicz, K., Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, III. Band, 10. Auflage, Berlin 1959, S. 107 ff.

4) Salveson, M.E., a.a.O., S. 560 f.

managerial decision-making functions: (a) planning, or that function connected with deciding what commodities to produce, deciding how many of each to produce, and deciding how to produce each of them; and (b) scheduling, or that function connected with deciding when to produce each commodity with reference both, to the intermediate and final properties ... ". In diesem Sinne entspricht Production planning der Produktionsprogrammplanung und Production scheduling der Produktionsdurchführungsplanung.

Es ist hier noch darauf hinzuweisen, daß bei deterministischen Produktionsprogrammplanungsmodellen die anschließende Produktionsdurchführungsplanung deterministische oder stochastische Modelle umfassen kann, während bei stochastischen Produktionsprogrammplanungsmodellen die darauf aufbauende Vollzugsplanung ebenfalls nur stochastisch sein kann.

1. Produktionsprogrammplanung

Wenn von Produktionsprogrammplanung gesprochen wird, kann damit eine Produktionsprogrammplanung in [1]

a. weiterem Sinn oder
b. engerem Sinn

gemeint sein.

a. Produktionsprogrammplanung in weiterem Sinn

Aus einer großen Zahl möglicher Produkte, die gefertigt werden können, sollen diejenigen ausgewählt werden, die nach Lage der Unternehmung günstig produziert werden können. Damit wird der Rahmen festgelegt, innerhalb dessen normalerweise Aufträge durchgeführt werden können, unter Angabe von Preisen und ähnlichen für den Verkauf

1) Vgl. Ellinger, T., Ablaufplanung, Grundfragen der Planung des zeitlichen Ablaufs der Fertigung im Rahmen der industriellen Produktionsplanung, Stuttgart 1959, S. 16.

wichtigen Daten. Ist eine Entscheidung in dieser Richtung einmal getroffen, wird sie meist für längere Zeit aufrecht erhalten. Es handelt sich also um eine langfristige Produktionsplanung, die auch auf den langfristigen Absatzplan Bezug nimmt und diesen beeinflußt.

b. Die Produktionsprogrammplanung in engerem Sinn

Ist der qualitative Rahmen festgelegt, auf Grund dessen dann grundsätzlich entschieden wird, welche Aufträge angenommen werden, und erfolgen dann solche Aufträge, so beginnt die Produktionsplanung in engerem Sinn. Diese stellt " ... als Ergebnis der Planung einen Produktionsplan für einen bestimmten Zeitabschnitt ..., der die in dieser Zeit zu fertigenden Produkte nach Art und Menge enthält ... " dar [1]. "Der Produktionsplan baut auf dem Verkaufsprogramm auf, das wiederum abhängig ist von dem Produktionsprogramm in weiterem Sinn und den Marktverhältnissen " [1]. In diesem Plan werden Mengen, Zeiten und andere Größen quantitativ eingesetzt. Darauf baut dann die Produktionsdurchführungsplanung auf, die das zeitliche Hinter- und Nebeneinander sinnvoll regelt.

Die Frage, welche Produkte im betrachteten Zeitabschnitt produziert werden solleb, tritt bei auftragsorientierten Betrieben in den Hintergrund. Wird davon ausgegangen, daß die Aufträge bereits vorliegen, dann ist von vorn herein als Datum der Planung festgelegt, welches Produkt in welchen Mengen produziert werden soll. Es bleibt dann zu prüfen, welche Einsatzfaktoren in welchen Mengen und Qualitäten verwendet werden sollen, und ob die vorhandenen Faktoren ausreichen für die zu planende Produktion. Mit den Problemen der Produktionsprogrammplanung in engerem Sinne hat sich diese Arbeit im

1) Ellinger, T., a.a.O., S. 17.

Wesentlichen zu befassen, wobei stellenweise eine Ausweitung des dadurch gesteckten Rahmens notwendig sein wird.

Einen etwas anderen Akzent bekommt die Produktionsprogrammplanung, wenn die Aufgabe gestellt wird, festzulegen, welche Aufträge angenommen und welche abgelehnt werden sollen. Grundsätzlich sind für eine solche Planung ähnliche Modelle zugrunde zu legen, allerdings unter Einsatz anderer Größen als Konstante und Variable. Diese Arbeit soll aber als Ausgangspunkt die Auftragslage als bekannt voraussetzen.

2. Produktionsdurchführungsplanung

Grundlage der Produktionsdurchführungsplanung, auch Vollzugsplanung genannt, ist das Fertigungsprogramm. Dieses stellt also ein Datum dar und wird durch die Vollzugsplanung ergänzt. Dabei kann diese in zwei Teilbereiche untergliedert werden [1]:

a. Bereitstellungsplanung und
b. Ablaufplanung.

zu a) Die Bereitstellungsplanung [2] befaßt sich mit dem rechtzeitigen Vorhandensein von Arbeitskräften, Werkstoffen und Betriebsmitteln nach Art und Menge am verlangten Ort.

zu b) Bei der Ablaufplanung geht es um den Ablauf des betrieblichen Leistungsprozesses schlechthin [3]. Es soll eine optimale Durchlaufgeschwindigkeit mit optimaler Auslastung des Betriebes verbunden werden, unter

1) Vgl. Mellerowicz, K., Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, a.a.O., S. 109. - Mellerowicz, K., Planung ..., a.a.O., S. 122. - Gutenberg, E., Grundlagen ..., a.a.O., S. 140 ff.
2) Gutenberg, E., Grundlagen ..., a.a.O., S. 141 ff.
3) Vgl. Gutenberg, E., Grundlagen ..., a.a.O., S. 165 ff. Der Behauptung Gutenbergs, daß Arbeitsablaufplanung eine Kunst und kein schematischer Vorgang sein kann, kann allerdings nicht zugestimmt werden. S. 159.

Einhaltung der geforderten Liefertermine, um eine möglichst große Wirtschaftlichkeit der Fertigung zu erreichen. Grundlage der Ablaufplanung ist das Fertigungsprogramm und die Bereitstellungsplanung. Es soll ein gegebenes Programm mit den vorhandenen Mitteln zeitlich so hinter- und nebeneinander durchgeführt werden, daß Leerzeiten und Wartezeiten in den Aggregaten weitestgehend ausgeschaltet werden.

3. Produktionsplanung und Zuteilungsprobleme

Zuteilungsprobleme (allocation problems) sind dann gegeben, wenn [1]

a. für eine Anzahl von Aufgaben oder Personen mehrere Alternativen möglich sind und

b. die dafür erforderlichen Faktoren, seien es Einsatzmaterialien, Arbeitskräfte oder monetäre Mittel, nur in einem so weit begrenzten Umfang vorhanden sind, daß nicht alle Aufgaben auf optimale Weise erfüllt werden können.

Es sind dann die vorhandenen Faktoren so zu kombinieren, daß für die Gesamtproduktion ein Optimum erreicht wird [2)3)].

1) Vgl. Kantorovich, L.V., "Mathematical Methods of Organizing and Planning Production", Übersetzung aus dem Russischen, zitiert nach Management Science, Vol. 6, 1960, S. 387.
2) Vgl. Peters, B., a.a.O., S. 26. - Ackoff, R.L., "The Development ...", a.a.O., S. 273. - Churchman, C.W. et al., a.a.O., S. 177 und S. 253.
3) Die in den letzten beiden Jahrzehnten vornehmlich in den USA entwickelten Methoden zur Lösung der Zuteilungsprobleme sind in der Literatur unter den Begriffen "Activity Analysis", "Mathematical Programming", speziell "Linear Programming" behandelt. Die ersten grundlegenden Arbeiten auf diesem Gebiet nach den Ansätzen von Von Neumann und Morgenstern (Spieltheorie) und von Leontief (Input-Output-Analyse) erschienen als Bericht der Cowles Commision von T.C. Koopmans, G.B. Dantzig und anderen. Koopmans, T.C. (ed.), Activity Analysis of Production and Allocation, Cowles Commission, Monograph Nr. 13, New York 1951, 2. Auflage 1956. - Vgl. auch Neumann, J.v. und Morgenstern, O., Theory of Games and

Im Rahmen dieser Arbeit sollen optimale Produktionsprogramme für j Produkte (j = 1, 2, ..., m) bestimmt werden, wobei Beschränkungen zu berücksichtigen sind, die durch nur begrenzt verfügbare Produktionsfaktoren gegeben sind. Es ist also, wenn mehr als ein Produkt hergestellt werden soll, was ein trivialer Fall wäre, für welchen keine komplizierten Lösungsverfahren notwendig sind, die Frage zu entscheiden, wie die begrenzt verfügbaren Faktoren den einzelnen Produkten zuzuteilen sind, damit die Gesamtproduktion in bezug auf eine gegebene Zielgröße optimal wird. Andererseits sind die Chargen der Produkte j so den einzelnen Aggregaten zuzuordnen, daß unter Berücksichtigung der gesamten Produktionskosten die Ausbringung auf Grund der gegebenen Auftragslage maximiert wird, bzw. daß eine bestimmte Auftragsmenge in einem Minimum an Zeit produziert werden kann. Es liegt also ein zweifaches Zuteilungsproblem vor, einmal Zuteilung der Faktoren auf die j Produkte, andererseits Zuteilung dieser Produkte auf die k Aggregate (k = 1, 2, ..., l).

Die zu optimierende Größe soll hier die Höhe der Produktionskosten sein, doch läßt sich auch eine Zeitminimierung oder die Minimierung der Faktoreinsatzmengen oder Maximierung des Gesamtgewinnes und anderes als mögliche Zielfunktion denken.

Fortsetzung der Fußnote von S. 28:
Economic Behavior, Princeton 1944. Deutsche Übersetzung: Spieltheorie und wirtschaftliches Verhalten, Würzburg 1961. - Leontief, W.W., "Quantitative Input and Output Relations in the Economic System of the United States", Review of Economic Statistics, Vol. 18, 1936, S. 105 - 126. - In den darauffolgenden Jahren erschienen dann weitere wesentliche Ergänzungen. Vgl. dazu: Ackoff, R.L., "The Development ...", a.a.O., S. 273 ff.

4. Produktionsplanungsprobleme und Zeitplanungsprobleme [1]

Die Planung des zeitlichen Ablaufes der Produktion wird im anglo-amerikanischen Schrifttum meist als "Production Scheduling" bezeichnet. Darunter werden alle Entscheidungen verstanden, die den zukünftigen zeitlichen Ablauf der Produktion festlegen, wobei verschiedene Gesichtspunkte den Betrachtungen zugrunde liegen können. Es kann z.B. gefordert werden, die gesamte Durchlaufzeit zu minimieren, das Ziel kann aber auch sein, spezielle Aggregate, z.B. die Schmelzöfen des Stahlwerks, maximal auszunutzen. Es kann auch eine Minimierung der Warte- oder Leerzeiten angestrebt werden und anderes.

Unter dem Aspekt dieser Arbeit wird die Frage beantwortet werden müssen, wie eine gegebene Auftragslage mit gegebenen, Beschränkten Produktionsfaktoren zeitlich so durchgeführt werden kann, daß die Gesamtkosten der Produktion minimiert werden können. Da die Produktionszeit ein wesentlicher Kostenfaktor ist kommt es weitgehend darauf an, optimale Zeitplanung zu treiben unter Vermeidung von zeitlichen Überschneidungen einerseits und von Leerzeiten andererseits.

Häufig werden in Betrieben zur Lösung derartiger Probleme optische Hilfsmittel angewandt. Churchman [2] weist in diesem Zusammenhang auf die Gantt-Diagramme hin. Solche Mittel sind sicher von Nutzen, sie lassen aber nicht erkennen, wie weit "... eine auf dieser Basis erzielte Ablaufplanung vom Optimum entfernt ist" [2]. Wie komplex diese Zusammenhänge sind mag aus einem Beispiel

---

1) Vgl. Churchman, C.W. et al., a.a.O., S. 409. Dort wird streng unterschieden zwischen Zeitplanung als der Festlegung der Zeitpunkte für den Zugang bzw. Abgang der abzufertigenden Einheiten, und der Ablaufplanung, die sich auf die Reihenfolge der Bedienung der ab zufertigenden Einheiten bezieht.

2) Churchman, C.W. et al., a.a.O., S. 410.

ersehen werden: sollen vier Produkte in fünf Aggregaten hergestellt werden, so gibt es für die Reihenfolge insgesamt $(4!)^5$ Kombinationsmöglichkeiten, das sind 7.962.624 Möglichkeiten für die Reihenfolge [1]. Hieraus mag die Schwierigkeit solcher Aufgaben ersichtlich sein. Selbst wenn ein Teil dieser Kombinationen technisch nicht realisierbar sind kann der Wert einer optimalen oder annähernd optimalen Reihenfolgebestimmung nicht übersehen werden.

Die Versuche, solche Zeitplanungsprobleme für deterministische oder stochastische Modelle aufzustellen, sind bisher nur mit begrenztem Erfolg unternommen worden. Es sind vorwiegend die Arbeiten von Johnson [2], Akers und Friedman [3], Nelson [4], Sisson [5], Bowman [6] und die von Rowe und Jackson [7] zu nennen.

---

1) Churchman, C.W. et al,, a.a.O., S. 410.

2) Johnson, S.M., "Optimal Two- and Three-stage Production Scheduling with Setup Times Included", Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 1, No. 1, 1954, S. 61 ff. - Johnson, S.M., "Sequential Production Planning over Time at Minimum Cost", Management Science, Vol. 3, 1957, S. 435 ff.

3) Akers, S.B. und Friedman, J., "A Non-Numerical Approach to Production Scheduling Problems", Operations Research, Vol. 3, 1955, S. 429 ff.

4) Nelson, R.T., "Waiting-Time Distributions for Application to Service Centers", Operations Research, Vol.6, 1958, S. 856 ff.

5) Sisson, R.L., "Methods of Sequencing in Job-Shops - A Review", Operations Research, Vol. 7, 1959, S. 10 ff. - Sisson, R.L., "Sequencing Theory", Chapter 7 in: Ackoff, R.L., Progress in Operations Research, Vol. I, New York - London 1961, S. 293 ff.

6) Bowman, E.H., "The Schedule-Sequencing Problem", Operations Research, Vol. 7, 1959, S. 621 ff. - Bowman, E.H., "Assembly-Line Balancing by Linear Programming", Operations Research, Vol. 8, 1960, S. 385 ff.

7) Rowe, A.J., und Jackson, J.H., "Research Problems in Production Routing and Scheduling", Journal of Industrial Engineering, Vol. VII, 1956, S. 116 ff. - Vgl. auch Giffler, B. und Thompson, G.L., "Algorithms for Solving Production-Scheduling Problems", Operations Research, Vol. 8, 1960, S. 487 ff.

Bisher sind noch keine geeigneten Verfahren bekannt, die es gestatten, Zuteilungs- und Zeitplanungsprobleme in geeigneter Weise simultan zu lösen, so daß Produktionprogramm- und Produktionsdurchführungsplanung in getrennten Schritten vorzunehmen sind.

B. DIE BESTIMMUNGSFAKTOREN FÜR DIE PRODUKTIONSPLANUNG IN STAHLWERKEN

Damit die Produktionsplanungsmodelle mathematisch formuliert werden können, müssen zunächst diejenigen Faktoren determiniert werden, welche diese Modelle bestimmen. Nachdem die Daten erfaßt sind, welche auf die Variablen des Modells Einfluß haben, können mit Hilfe mathematischer Methoden unter Vornahme gewisser Abstraktionen Produktionsmodelle gebildet werden, also gedankliche Abbilder der betrachteten Produktionsverfahren [1]. Wegen der sehr großen Zahl solcher das Produktionsmodell beeinflußender Daten im Stahlwerk - wie ganz allgemein im industriellen Bereich - ist für die vorliegende Untersuchung eine Auswahl und Beschränkung auf solche Variable erforderlich, welche typisch sind und die Modelle wesentlich bestimmen. Darüber hinaus können nur diejenigen Größen berücksichtigt werden, die eindeutig quantifizierbar sind, als deterministische oder stochastisch Größen, da sonst keine mathematischen Zusammenhänge darstellbar sind.

Die Produktionsplanungsmodelle in Stahlwerken werden durch nachfolgend aufgeführte Faktoren bestimmt [2]:

1) Vgl. Churchman, C.W., et al., a.a.O., S. 151 ff. - RKW-Ausschußdienst, Ablauf- und Planungsforschung, a.a.O., S. 58. - Peters, B., a.a.O., S. 34. - Hall, R., Das Rechnen mit Einflußgrößen im Stahlwerk, Köln - Opladen 1959, S. 5. - Rummel, K., Einheitliche Kostenrechnung, 3. Auflage, Düsseldorf 1949, S. 177.

2) Vgl. Ballendat, K., a.a.O., S. 336 ff.

1. Die Planungsperiode
2. Die Auftragsverhältnisse
3. Das Produktionsverfahren
4. Die Einsatzverhältnisse - der Input
5. Die Ausbringung der Produkte - der Output
6. Gegebenheiten der Produktion
7. Der Betriebsgesamtzusammenhang
8. Die Kosten der Produktion.

1. Die Planungsperiode

Die Produktionsplanung ist in allen Einzelheiten jeweils auf eine ganz bestimmte Planungsperiode T abgestellt. Dabei kommt es bei der Unterscheidung zwischen kurzen und langen Perioden nicht auf die absoluten Zeitspannen an, sondern auf die Konstanz oder Variabilität wesentlicher Bestimmungsfaktoren. "... Die Länge der Planungsperiode nimmt in der Regel weniger Einfluß auf die Genauigkeit der Plandaten als die Unstabilität und Unüberschaubarkeit bestimmter Einzelfaktoren ... " [1]. In den meisten Fällen genügt zur Abgrenzung der kurzen von der langen Periode die Betrachtung der jeweiligen Gesamt- oder Teilkapazität [2)3)]. Bleibt diese konstant, so spricht man von kurzer Periode, entsprechend bei variabler Kapazität von langer Periode. Wenn " ... der Zeitraum, der den Unternehmen für ihre betrieblichen Maßnahmen zur Verfügung steht, zu kurz ist, um grundlegende Änderungen, insbesondere der Betriebsgröße, vorzunehmen ... " [4], dann spricht man von einer kurzen Periode. Dabei kann eine zeitliche Anpassung vorgenommen werden bis hin zu einer absoluten Maximalgrenze, die nicht überschritten werden kann.

---

1) Bierfelder, W., a.a.O., S. 57 f.

2) Kapazität wird dabei verstanden als die maximale Leistungsfähigkeit einer Betriebseinrichtung.

3) Gutenberg, E., Grundlagen ..., a.a.O., S. 306. - Vgl. Angermann, A., Gleichgewichtskalkulation, Meisenheim 1952, S. 13. - Mellerowicz, K., Betriebswirtschaftslehre der Industrie, 3. Auflage, Freiburg 1958, S. 239. - Schneider, E., Einführung in die Wirtschaftstheorie, II. Teil, 7. Auflage, Tübingen 1961, S. 230 ff.

4) Gutenberg, E., Grundlagen ..., a.a.O., S. 306.

Für eine wesentlich auftragsorientierte Produktion ist ein weiteres Kriterium für die Abgrenzung der kurzen von der langen Periode charakteristisch. Eine Periode ist so lange kurz, so lange für eine gegebene Kapazität eine bekannte Bedarfsfunktion für die Produktion vorliegt. Ist kein genügender Auftragsbes and vorhanden, so daß die Bedarfsfunktion nur durch Schätzwerte stochastischer Natur abgegeben werden kann, dann muß von langer Periode gesprochen werden. Eine Berechenbarkeit solcher langer Perioden ist allerdings nur vorhanden, wenn bekannte Wahrscheinlichkeitsverteilungen für den künftigen Bedarf angegeben werden können.[1] Nur in diesem Sinn soll von langfristiger Periode gesprochen werden. Liegen solche bekannten stochastischen Verteilungen nicht vor, ist im allgemeinen eine Planung im strengen Sinn nicht mehr möglich.

2. Die Auftragsverhältnisse

Bei typisch auftragsorientierten Betrieben, und als solche sind die Stahlwerke durchweg anzusehen, stellt der vorhandene Auftragsbestand das wesentliche Datum für die gesamte Produktionsplanung dar. Dabei sind die Beziehungen zum Einteilungskriterium in kurzfristige und langfristige Perioden, wie sie im vorhergehenden Abschnitt herausgearbeitet wurden, zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang ist die Einteilung der Aufträge in

a. Kundenaufträge
b. Lageraufträge
c. innerbetriebliche Aufträge

gegenstandslos[2]. Grundsätzlich soll eine Lagerproduktion

1) Vgl. Wöhe, G., Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Berlin - Frankfurt 1960, S. 135.

2) Mellerowicz, K., Kosten ..., a.a.O., S. 185. - Vgl. Hennig, K.W., Betriebswirtschaftslehre der industriellen Erzeugung, in: Die Wirtschaftswissenschaften, Wiesbaden 1960, S. 72.

beim Stahlwerk ausgeschlossen sein. Eine Lagerung von Produkten des Stahlwerks ist zwar in der Praxis möglich, doch wird hier ganz allgemein das "Arbeiten in einer Hitze" als Betriebsziel vorausgesetzt, wobei die ausgebrachten Produkte ohne vorherige Abkühlung an die nachfolgende Produktionsstufe des Walzwerks weitergegeben werden. Wenn diese Arbeitsweise als Ziel der Produktion unterstellt wird, und das kann in weitgehender Annäherung an die Praxis getan werden, entfällt aber damit eine Lagerung der abgegossenen Rohstahlblöcke. Es soll weiter von einer reinen Kundenproduktion ausgegangen werden, wobei der Fall, daß die Unternehmung selber als Auftraggeber auftritt, zwecks Durchführung innerbetrieblicher Aufgaben, nicht ausgeschlossen sein soll. Eine Aufteilung der Aufträge nach Auftraggeber ist aus diesem Grunde für die Stahlwerksproduktion irrelevant.

Eine Behandlung der Aufträge nach dem Kriterium [1]

a. Gesamtumfang der Aufträge
b. Auftragsgröße
c. Auftragseigenart

ist dagegen für die Stahlwerksproduktion wichtig und soll hier kurz dargestellt werden.

zu a) der Gesamtumfang der Aufträge bestimmt die Beschäftigungshöhe eines Betriebes und legt die Bedarfsfunktion für die Planungsperiode T fest. Wird die Periode T in z regelmäßige oder unregelmäßige Zeitintervalle t eingeteilt (t = 1, 2, ..., z), so ergibt sich

$$m_j(t) \qquad (0 \leq t \leq T)$$

als die Bedarfsfunktion. Für die Gesamtheit aller in einer Produktionsstätte hergestellten Produkte ist dann die Bedarfsfunktion M_j (j = 1, 2, ..., m) als

1) Lehmann, M.R., Industriekalkulation, 2. Auflage, Stuttgart 1941, S. 122 ff. - Vg. Ballendat, K., a.a.O., S. 338.

kumulativer Bedarf aller t Zeitintervalle bei kontinuierlicher Teilbarkeit der Produkte

$$M_j(t) = \int_0^t m_j(t)\, dt$$

oder bei diskontinuierlicher Teilbarkeit

$$M_j(t) = \sum_{t=1}^{m} m_j(t) \ .$$

Soll beispielsweise die Planungsperiode ein Monat sein (T = 30 Tage = 720 Stunden) , so können die Zeitintervalle t Tage, Wochen, Dekaden oder andere unregelmäßige Zeitabschnitte sein, z.B. Reparaturzyklen.

Ist der Auftragsbestand nicht groß genug, um damit während einer vollen Planungsperiode mit determinierten Produkten die Fertigung durchzuführen, so können kürzere Perioden geplant werden. Damit kann die Einführung stochastischer Daten umgangen werden. Dieser Weg ist aber nicht in allen Fällen möglich, so daß stochastische Modelle in die Betrachtung eingeführt werden müssen.

zu b) Die Größe des einzelnen Auftrages ist von Einfluß auf die Belastung der Schmelzaggregate. Aufträge, die keine vollen Chargen in Anspruch nehmen, müssen solange zurückgestellt werden, bis andere Aufträge derselben Stahlqualität eingehen. Es soll bei den Modellen davon ausgegangen werden, daß jeweils nur volle Chargen erschmolzen werden. Ergibt sich keine Möglichkeit, ganze oder Teile bestimmter Aufträge mit anderen Auftragsteilen auf volle Chargen aufzufüllen, so können diese nicht in Produktion genommen werden. Gegebenenfalls ist auf die Besteller einzuwirken, entsprechende Aufträge abzuändern. Für die Abteilung, welche die Bestellungen entgegennimmt, ergibt sich die Konsequenz,

nur solche Aufträge anzunehmen, die mit Sicherheit im Rahmen der hier gestellten Bedingungen ausführbar sind. Gegebenenfalls sind bei Sonderbestellungen die Lieferfristen entsprechend lang zu halten, um mehrere kleinere Aufträge zusammenfassen zu können.

zu c) Spezielle Anforderungen an die Produktionsplanung können durch die Auftragseigenart gestellt werden. Es gibt Fälle, in denen sich die Aufeinanderfolge bestimmter Chargen im gleichen Aggregat verbietet. So ist es z.B. nicht möglich, kupferlegierte Chargen zu erschmelzen, und daran anschließend im gleichen Ofen solche Chargen, die extrem kupferarm sein müssen, weil die Entfernung dieses Elementes beim Stahlerschmelzungsprozeß nicht möglich ist, und sich immer Reste einer Charge noch im Ofen befinden, wenn die nächste eingesetzt wird. Eine andere Möglichkeit solcher Präferenzen, die vor allem bei der Produktionsdurchführungsplanung zu berücksichtigen sind, bei welcher die Schmelzenfolge festgelegt wird, kann durch die Temperaturführung bedingt sein oder durch die Einwirkung verschiedener Stahlqualitäten auf die Ofenauskleidung. So greifen z.B. tiefgekohlte Stähle (niedriger Kohlenstoffgehalt), die gleichzeitig nur geringe Schwefel- und Phosphorgehalte zulassen [1], wegen der aus physikalisch-chemischen Gründen längeren Kochzeit und notwendig höheren Arbeitstemperatur das Ofenfutter und die Auskleidung der Regenerativkammern bei Siemens-Martin-Öfen stärker an als normale Baustähle mit relativ hohen zulässigen Kohlenstoff-, Schwefel- und Phosphorgehalten. Es ist also bei der Planung der Produktion darauf zu achten, daß die Chargenfolge in den einzelnen Öfen so gehalten wird, daß sich keine nachteiligen Wirkungen auf die technische Ausrüstung bemerkbar machen können.

1) Solche Qualitäten sind vor allem Tiefziehgüten, die weiche und zähe Stähle sind, wobei hoher Kohlenstoffgehalt den Stahl härter, hoher Schwefelgehalt den Stahl spröder macht.

Eine andere Art von Auftragseigenart, die sich auf die Chargenfolge auswirken kann und die einer Optimierung der Planung entgegenstehen kann, sind terminbedingte Präferenzen. Solche Einflüsse sind häufig einer zahlenmäßig exakten Erfassung nur schwer zugänglich, doch sollte es auch beim praktischen Betrieb möglich sein, hierüber brauchbare Unterlagen zu erhalten. Erfahrungen in dieser Richtung liegen allerdings noch nicht vor.

3. Das Produktionsverfahren

Die zur Stahlherstellung möglichen Verfahren, - Windfrischverfahren, Herdfrischverfahren und Elektrostahlverfahren, - liefern ein qualitätsmäßig so unterschiedliches Produkt, daß eine Wahl zwischen ihnen im praktischen Betrieb kaum in Frage kommt. Im Regelfall sind die Aufträge hinsichtlich der geforderten Qualität in physikalischer, chemischer und technologischer Sicht so weit spezifiziert, daß jeweils nur ein bestimmtes Verfahren in Frage kommt. Derartige Auflagen werden bereits vom Kunden bei der Aufgabe der Bestellung vorgenommen. Aus diesen Gründen ist das Produktionsverfahren nicht als Variable sondern als vorgegebene Plangröße zu betrachten, über die in der Produktionsplanung nicht mehr verfügt werden kann. Darüber hinaus ist bereits darauf hingewiesen worden, daß sich grundsätzlich alle diese Herstellungsverfahren modellmäßig aufden einen Typ des Siemens-Martin-Verfahrens reduzieren lassen [1], ungeachtet der verschiedenen technischen Voraussetzungen. Dies wird in den folgenden beiden Abschnitten noch deutlicher werden, wenn die Einsatzverhältnisse und die Ausbringung der Produkte näher betrachtet werden.

1) Vgl. Fabian, T., a.a.O., S. 421.

4. Die Einsatzverhältnisse - der Input

Die Produktionsstätten können in einsatz- und abgabeorientierte eingeteilt werden [1]. Bei den einsatzorientierten Produktionsstätten bildet der Input die Grundlage der Produktionsplanung. Umgekehrt geht bei den abgabeorientierten Betrieben die Planung von den festliegenden Plänen für die Abgabe der Produkte aus. Dies ist bei den Stahlwerken der Fall, wie schon mehrfach herausgestellt wurde. Der Einsatz der Werkstoffe richtet sich nach den für die Kundenbestellungen unter technischen Bedingungen der Verfahren notwendigen Grundsätzen.

Unter Werkstoff soll hier die Gesamtheit der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe verstanden werden, so wie die fremdbezogenen Halb- und Fertigfabrikate und die Produkte vorgeschalteter Produktionsstätten. In diesem Sinne gebraucht Sundhoff [2] den Begriff Werkstoff. Abweichend davon versteht Gutenberg [3] unter dem Faktor Werkstoff " ... alle Rohstoffe, Halb- und Fertigerzeugnisse ... , die als Ausgangs- und Grundstoffe für die Herstellung von Erzeugnissen zu dienen bestimmt sind. Nach der Vornahme von Form- und Substanzveränderungen oder nach dem Einbau in das Fertigerzeugnis werden sie Bestandteil des neuen Produktes ". Gutenberg stellt also darauf ab, daß die Werkstoffe Bestandteil des Produktes werden. Wir wollen uns hier der allgemeineren Formulierung von Sundhoff anschließen, weil damit auch Einsatzfaktoren wie Energie erfaßt werden können, die zur Produktion notwendig sind, aber nicht Bestandteil des Produktes werden.

---

1) Vgl. Peters, B., a.a.O., S. 35.

2) Sundhoff, E., Grundlagen und Technik der Beschaffung von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen, Essen 1958, S. 22.

3) Gutenberg, E., Grundlagen ..., a.a.O., S. 4. - Vgl. Kalveram, W., Industriebetriebslehre, 7. Auflage, Wiesbaden 1960, S. 68.

Der Einsatz des Faktors Werkstoff besteht aus mehreren Werkstoffarten unterschiedlicher Qualität und Quantität, z.B. Roheisen, Schrott verschiedener Sorten, aber auch Brennstoffe wie Öl und Gas, Energie usw. Daneben sind auch noch andere Faktoren, nämlich menschliche Arbeit und der Einsatz von Betriebsmitteln, z.B. der Schmelzaggregate und der zugehörigen Betriebseinrichtungen zu berücksichtigen.

Die Faktoreneinsätze können [1]

a. kontinuierlich und
b. diskontinuierlich sein.

a. Kontinuierliche Einsatzfaktoren

DerFall kontinuierlicher Einsätze bezieht sich vor allem auf die Zusammensetzung des metallischen Einsatzes für eine volle Charge. Grundsätzlich können alle Einsatzfaktoren i (i = 1, 2, ..., v) in jeder beliebigen Menge von 0 bis 100 %, bezogen auf den Gesamteinsatz, eingesetzt werden, wobei die Summe das jeweilige Chargengewicht ergibt. Wird das volle Chargengewicht mit 1 definiert, so ergibt sich

$$\sum_{i=1}^{v} a_i = 1; \quad 0 \leq a_i \leq 1 .$$

Ein durch eine so definierte Einsatzzusammensetzung bestimmter Punkt soll als Prozeßpunkt P_h bezeichnet werden. Bei kontinuierlicher Teilbarkeit der Faktoren handelt es sich hier um Substitution zwischen einer unendlichen Anzahl linear-limitationaler Faktoren [2]. Eine Prozeßmöglichkeit wäre beispielsweise, nur Faktor 1 einzusetzen, eine andere 80 % Faktor 1 und 20 % Faktor 2 usw. Jeder Dieser Kombinationen ist für ein bestimmtes Produkt j ein definierter, empirisch bzw.

1) Vgl. Churchman, C.W., et al., a.a.O., S. 190.
2) Vgl. Schneider, E., Einführung ..., a.a.O., S. 214ff.

statistisch festgelegter Zeitbedarf t_{hj} für eine Charge zugeordnet. Dabei sind die möglichen P_h-Kombinationen für alle Produkte gleich, während die zugehörigen Zeitbedarfswerte vom Produkt j abhängig sind. Sind für ein bestimmtes Produkt gewisse Kombinationen nicht zulässig, erhalten die entsprechenden P_h die Größe Null. Dieser Fall ist denkbar, wenn chemische Elemente in unzulässiger Menge in einem bestimmten Einsatzfaktor enthalten sind.

Alle Kombinationen, welche der Gleichung

$$P_h = a_1 s^k + a_2 s^k + \ldots + a_v s^k = \sum_{i=1}^{v} a_i s^k$$

$(i_k = 1, 2, \ldots, v;\ h = 1, 2, \ldots, p;\ k = 1, 2, \ldots, l)$
$(s^k_o \neq$ Ofenkapazität im Aggregat k)

genügen, sind Punkte einer Hyperebene im v-dimensionalen Raum. Für den Fall, daß drei Einsatzfaktoren gegeben sind, kann das wie folgt dargestellt werden (Fig.1):

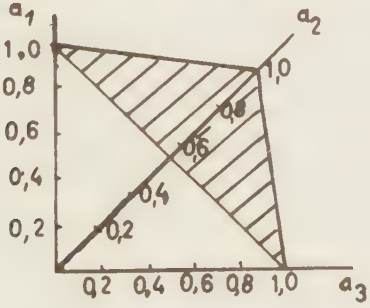

Fig.1

Alle Punkte, die auf der schraffierten Fläche liegen, genügen der Gleichung

$$a_1 + a_2 + a_3 = 1 .$$

Soll auch der Fall zugelassen sein, daß die Ofenkapazität nicht voll ausgelastet wird, so erhält man entsprechend

$$P_h = a_1 s^k + a_2 s^k + \ldots + a_v s^k = \sum_{i=1}^{v} a_i s^k = 1 .$$

Damit sind alle Punkte auf der schraffierten Fläche und darunter zulässige Prozeßpunkte.

Bestimmte Einsatzfaktoren können in ihrer Anwendung nach unten oder nach oben beschränkt sein. Es kann z.B. Ziel der Unternehmung sein, alles im eigenen Hochofen hergestellte Roheisen in der Stahlwerksproduktion zu verwenden. Dadurch wird die Forderung begründet, jeder Charge eine Mindestmenge flüssiges Roheisen zuzusetzen. Andererseits ist dem Roheisenanteil nach oben eine Grenze gesetzt. Wird eine große Menge flüssiges Roheisen gleichzeitig eingesetzt, so verstärkt das momentane große Kohlenstoffangebot die Kochbewegung im Bad sehr erheblich. Dies kann zu einer Gefährdung der Sicherheit von arbeitenden Menschen, aber auch zu übermässigem Angriff oder zur Zerstörung von Ofengewölbe, von Herd oder anderen Ofenteilen führen. [1] Es kann nur in mehr oder weniger großen zeitlichen Abständen Roheisen in bestimmten Höchstmengen eingesetzt werden, um die Badbewegung unter Kontrolle zu halten und ein metallurgisch einwandfreies Arbeiten zu ermöglichen. Solche Beschränkungen können wie folgt formuliert werden: Soll der Faktor a_i mit nicht weniger als z.B. 20 % und nicht mehr als 80 % des Gesamteinsatzes eingesetzt werden, so gilt

$$0{,}2 \leq a_i \leq 0{,}8 .$$

1) Fabian, T., a.a.O., S. 434: "Since hot metal cannot be used up to 100 percent in open hearth steel production (because of the violent and dangerous boil it would cause in the furnace. The upper limit is possibly less than 80 percent, it is between 0,72 and 0,80. Truly this constraint is an economic rather than a technological one; its value should depend on the marginal cost, in terms of safety cost and furnace repair cost, of added hot metal percentage), a constraint on the upper limit for hot metal use, at about 80 percent has to be formulated ...".

Dadurch wird die Variationsmöglichkeit der Prozeßpunkte P_h eingeschränkt. Graphisch ergibt sich für i = 3 die Fig. 2.

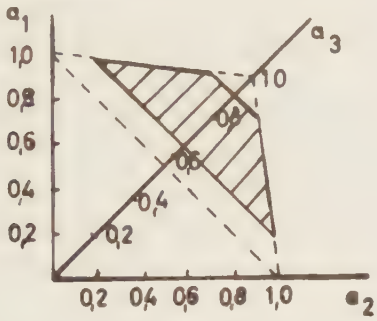

Fig. 2

Der zulässige Bereich der Prozeßpunkte wird eingeschränkt, wie ein Vergleich von Fig. 1 und Fig. 2 deutlich macht.

b. Diskontinuierlicher Einsatz

Offensichtlich sind diskontinuierliche Einsatzfaktoren gegeben durch die verschiedenen Aggregate. Es kann jeweils nur ein ganzes Aggregat, seien es Schmelzöfen oder Gießaggregate, eingesetzt werden. Aber auch durch die Rohstoffe können Diskontinuitäten in den Einsatzmengen bedingt sein.

Da beim Stahlwerksbetrieb keine sprunghaften Änderungen in bezug auf die Chargendauer zu erwarten sind und sich bei Variation um jeweils beispielsweise 10 % ($\Delta a_i = 0,1$) keine sehr einschneidenden Einflüsse auf die Schmelzdauer ergeben, ist diese Art der Festlegung von Prozeßpunkten für den praktischen Betrieb zulässig und ausreichend. Darüber hinaus steht es jederzeit offen, die Unterteilung so fein wie gewünscht vorzunehmen. So kann auch zunächst in einer Überschlagsrechnung

für jedes Produkt der optimale Bereich der Einsatzzusammensetzung ermittelt werden, und dann in einer weiteren Rechnung dieser Bereich feiner unterteilt werden. Dies Verfahren empfiehlt sich besonders, wenn solche Rechnungen von Hand durchgeführt werden sollen. Eine sehr große Anzahl solcher Prozeßpunkte, die sich bei kleinen Variationsbereichen ergibt, ist im praktischen Betrieb in der Regel nicht nötig, da die Chargendauer nicht nur auf Grund der Einsatzverhältnisse festgelegt werden kann, sondern es wirken immer noch eine Reihe anderer Faktoren mit, die zum Teil nicht exakt quantifiziert werden können. Deshalb genügt unseres Erachtens eine Variationsbreite von jeweils 20 %, im Höchstfall von 10 %. Bei einer Variationsbreite von 10 % und drei Einsatzfaktoren sind bereits 66 Prozeßpunkte möglich. Diese Zahl steigt sehr stark mit der Zunahme der Einsatzfaktoren.

Graphisch können solche Gitterpunktschemata entsprechend Fig. 1 bei Variationsmöglichkeit von 0 bis 100 % (Fig. 3) bzw. bei eingeschränktem Variationsbereich entsprechend Fig. 2 (Fig. 4) für diskontinuierlichen Einsatz ebenfalls dargestellt werden.

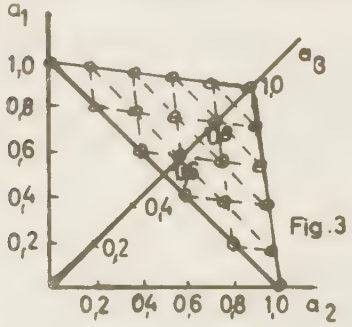

Fig.3

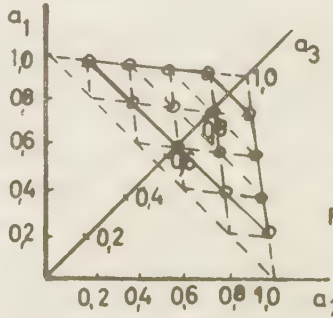

Fig.4

Die bei einer Variationsbreite von 20 % möglichen Prozeßpunkte sind in diesen beiden Schaubildern besonders gekennzeichnet. Solche Einsatzbeschränkungen

können bei den Produktionsplanungsmodellen als zusätzliche Restriktionen auftreten.

5. Die Ausbringung der Produkte - der Output

Dem Output der Produkte als dem grundlegenden Datum für die Produktionsplanung abgabeorientierter Betriebe kommt für unsere Überlegungen zentrale Bedeutung zu.

Der Bedarfsplan, sei er deterministisch oder stochastischer Natur [1], fixiert die abzugebenden Produkte nach Art und Menge. Dabei ist für jede herzustellende Stahlqualität ein besonderer Bedarfsplan aufzustellen, da die verschiedenen Produkte wegen der unterschiedlichen physikalischen, technologischen und chemischen Eigenschaften, auf die sich die jeweiligen Besteller beziehen, nur sehr bedingt gegenseitig substituierbar sind. Es sind also ebensoviele Bedarfspläne aufzustellen, wie Qualitäten erschmolzen werden sollen. In diesen Plänen müssen detaillierte Angaben über die bestellten Mengen und die geforderten Liefertermine und Lieferbedingungen enthalten sein.

Generell können die einzelnen Produkte kontinuierlich oder diskontinuierlich teilbar sein. Die Kontinuierlichkeit der Teilung bleibt erhalten, wenn das Stranggieß-

1) Zur Abgrenzung deterministischer und stochastischer Daten vgl. Förstner, K., "Bemerkungen zur Wirtschaftsmechanik", Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 29, 1959, S. 38 ff. - Haertel, R., "Methoden des Operations Research in der Industrie", Informationstagung in St. Gallen, Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 30, 1960. S. 255: "Entscheidungsmodell: aus einer Reihe von Möglichkeiten, für die sich ein Wirtschaftssubjekt entscheiden kann, soll eine 'beste' ermittelt werden. Ist jeder Entscheidung eine bestimmte Auswirkung zugerechnet, spricht man von einem deterministischen Entscheidungsmodell. Neben einer Beschreibung der möglichen Entscheidungen müssen also auch noch Angaben über deren Auswirkungen vorliegen ... Hat man zu jeder Entscheidung eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Auswirkung, so spricht man von stochastischen Entscheidungen ...".

verfahren [1] angewandt wird. Dabei wird mittels spezieller technischer Einrichtungen die Stahlschmelze direkt im Anschluß an ein kontinuierliches Vergießen ohne vorherige Abkühlung und Zwischenaufheizung verwalzt. Erst nach dem Walzvorgang werden die Produkte geteilt, entsprechend den Bestellungen. Die Diskontinuität der Teilbarkeit der Schmelze ergibt sich, wenn bereits beim Vergießen von den bestellten Mengen ausgegangen wird und die Charge in Kokillen vergossen wird. Die abgegossenen Blöcke sind mit einem Mindestgewicht angegeben, zu dem dann zusätzlich zum bestellten Gewicht noch ein Aufschlag für Schrottentfall hinzukommt, der empirisch festgelegt werden muß. Diese Größe läßt sich unter gewissen Annahmen auch berechnen, und wenn dies möglich ist, soll eine solche Berechnung vorgenommen werden [2]. Um sicher zu gehen, daß keine Prddukte mit Untergewicht oder zu geringen Abmessungen hergestellt werden, da nicht bestellungegerechte Lieferungen häufig nicht anderweitig verwendbar sind und dann nur noch Schrottwert haben, wird noch ein Sicherheitszuschlag zugegeben. Es ist jeweils fallweise zu prüfen, wie groß dieser Zuschlag sein soll, wobei die Kosten der Mehrproduktion und die Risikokosten von Fehlaufträgen gegenübergestellt werden müssen.

Der Bedarf für die künftige Planungsperiode kann bekannt oder geschätzt [3] sein, d.h. die Bedarfsfunktion

$$m_j(t) \quad \text{bzw.} \quad M_j(t)$$

---

1) Vgl. Benteler, H., "Entwicklung des Stranggießens von Stahl zum unmittelbaren Auswalzen von Warmband", Stahl und Eisen, Jg. 82, 1962, S. 397 ff. - Defossez, P., "Ausblicke auf die Herstellung von Brammen im Stranggießverfahren für Breitband- und Grobblechwalzwerke", Stahl und Eisen, Jg. 82, 1962, S. 1469 ff.

2) Vgl. RKW-Auslandsdienst, Arbeitsvorbereitung, Fertigungsplanung und Fertigungssteuerung in USA, Heft 63, München 1959, S. 125.

3) Vgl. Churchman, C.W., et al., a.a.O., S. 190.

ist Grundlage

a. deterministischer oder
b. stochastischer

Modelle für die Produktionsprogrammplanung.

zu a) Bekannte Bedarfsfunktion ist dann gegeben, wenn für den Planungszeitraum alle Bestellungen in sämtlichen Einzelheiten nach Qualität, Menge und Lieferzeitpunkt bekannt sind. Dabei können weiter zwei Fälle unterschieden werden:

aa. Konstante Bedarfsmenge pro Zeiteinheit
bb. Variable Bedarfsmenge pro Zeiteinheit.

zu aa) Dieser Fall konstanter Bedarfsmenge pro Zeiteinheit ist dann realisiert, wenn Chargen gleichen Gewichtes mit konstanter Chargendauer ausgebracht werden. Andererseits ist aber auch der Fall denkbar, daß die Ausbringungsmenge linear proportional der Chargendauer ist. Doch läßt sich ein solches Abhängigkeitsverhältnis nicht durch Zahlen aus dem praktischen Betrieb des Stahlwerks belegen.

Konstante Bedarfsmengen pro Zeiteinheit können kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Verlauf haben. Kontinuierlich sind sie dann, wenn eine stetige Bedarfsfunktion vorliegt, d.h. wenn bei der Produktion kleinste Zeitintervalle ($\Delta t \to 0$) vorliegen. Dieser Fall ist in den herkömmlichen Stahlwerken nicht zu finden. Wohl gibt es kontinuierliche Gießverfahren wie das schon erwähnte Stranggießverfahren, es sind aber noch keine kontinuierlich arbeitenden Schmelzverfahren bekannt und in der nächsten Zukunft ist eine Entwicklung solcher Verfahren kaum zu erwarten. Deshalb kann dieser Fall hier aus der Betrachtung herausbleiben. Möglich ist dagegen, daß für die Stahlwerksproduktion diskontinuierlich konstante Bedarfsmengen pro Zeiteinheit

vorliegen. In diesem Fall wird eine festgelegte Menge in größeren Zeitintervallen ($\Delta t \gg 0$) produziert, wobei die Zeitabschnitte regelmäßig oder unregelmäßig sein können. Bei Regelmäßigen Intervallen entsteht eine Treppenfunktion mit gleicher, sonst mit ungleicher Stufenbreite (Fig. 5 und Fig. 6). Die Fig 6 gibt den Fall wieder, daß ein jeweils gleiches Chargengewicht mit unterschiedlicher Chargendauer ausgebracht wird. Dies ist typisch für die Produktion von Chargen unterschiedlicher Stahlqualität bei gleicher Chargengröße.

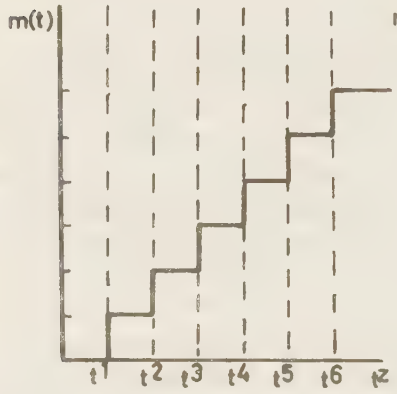

Fig. 5

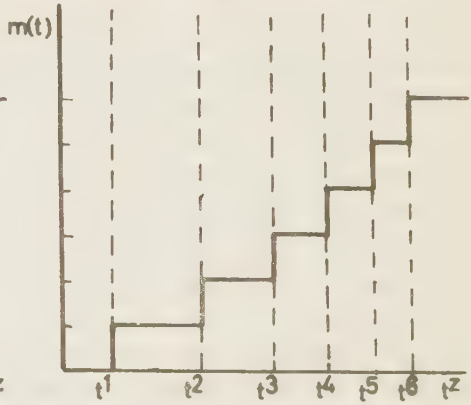

Fig. 6

Zu bb) Variable Bedarfsmengen pro Zeiteinheit ergeben sich dadurch, daß mehrere Produktarten gefordert werden, deren Mengen in den verschiedenen Planungsperioden unterschiedlich groß sind. Auch hier kann wie unter aa) in bezug auf die Zeit kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Bedarf unterschieden werden. Im Fall der Kontinuität kann die Bedarfsfunktion jede gerade oder gekrümmte Form annehmen (Fig. 7). Der waagerechte Verlauf ist der Sonderfall der konstanten Bedarfsfunktion.

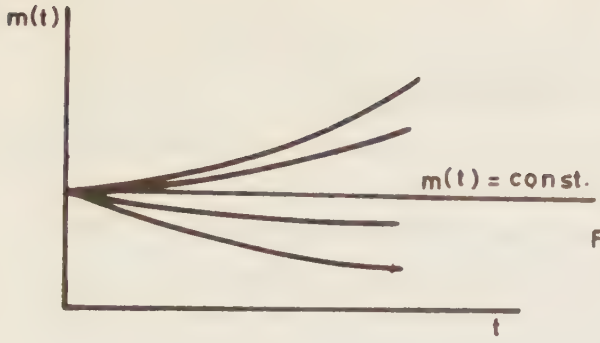

Fig.7

Zu b) Wenn ungewisse Bedarfsfunktionen vorliegen, müssen stochastische Modelle mit gegebenen Wahrscheinlichkeitsfeldern eingeführt werden. Wenn stochastische Werte der Vergangenheit vorhanden sind, kann dabei die Wahrscheinlichkeitsrechnung zu Hilfe genommen werden. Liegen derartige brauchbare statistische Werte nicht vor, so muß durch Simulationsverfahren oder durch Heranziehen statistischer Unterlagen ähnlicher anderer Probleme versucht werden, eine Bedarfsfunktion festzulegen. Marktanalyse, Marktbeobachtung und Marktforschung können hier wertvolle Dienste leisten [1].

Die Bedarfsfunktion ist durch Produktart, Menge und Zeit des Bedarfs eindeutig determiniert. Die Ungewißheit kann sich demgemäß auf die Produktart, die Bedarfsmenge oder die Bedarfszeiten erstrecken. Ist nur eine dieser Größen ungewiß , so müssen bereits stochastische Modelle gebildet werden.

1) Vgl. Schäfer, E., "Marktforschung", in: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Stuttgart-Tübingen- Göttingen, Band 7, 1961, S. 147 ff.

6. Gegebenheiten der Produktion

Die Produktionsplanung in Stahlwerken wird durch folgende Daten des Fertigungsbereiches beeinflußt:

a. die Art der Produktivfaktoren
b. Beschränkungen
c. Organisation des Fertigungsbereiches der Produktionsstätte
d. Anzahl der Operationen
e. Arten des Materialflusses
f. Einfluß der Durchlaufzeit.

a. Art der Produktivfaktoren

Die für die Ausführung der geplanten oder zu planenden Produktion erforderlichen Produktivfaktoren können, bezogen auf die Kapazität des Betriebes oder der Produktionsstätte, fix oder variabel sein. Beispiele für kapazitätsfixe Faktoren sind die vorhandenen Schmelzaggregate, die Krananlagen, die übrigen Transporteinrichtungen, Büros und Lagerräume usw. Da die Kapazität bei langfristiger Betrachtung in allen Teilen variabel ist, sind auch fixe Faktoren nur bei kurzfristiger Betrachtung möglich.

Variable Produktivfaktoren können weiter unterteilt werden in

aa. chargenfixe und
bb. chargenvariable Faktoren.

aa. Chargenfixe Faktoren

Chargenfixe Faktoren sind solche, die nur von der Anzahl der in der Planungsperiode erschmolzenen Chargen direkt abhängig sind. Es können auch solche Faktoren sein, die regelmäßig bei jeder Charge eines bestimmtes Produktes j verbraucht werden. Unabhängig sind diese Faktoren vom jeweiligen Chargengewicht und der Chargendauer. Das Bereitstellen der Gießpfannen und Schlackenkübel, der Gießzüge, aber auch regelmäßig anfallende Flickarbeiten der Ofenausmauerung (z.B. Auswerfen des Her-

des der Siemens-Martin-Öfen mit einer Dolomitschicht) sind Beispiele hierfür. Ebenfalls Umstellungsarbeiten fallen hierunter, besonders wenn sie für eine bestimmte Produktart bei jeder Charge erforderlich werden.

bb. Chargenvariable Faktoren

Die erforderliche Menge chargenvariabler Faktoren ist abhängig vom eingesetzten Chargengewicht oder/und von der Chargendauer. Hierzu gehören neben den Rohstoffen der Energieverbrauch, unter gewissen Umständen kann auch der Einsatz menschlicher Arbeitskraft hierunter gezählt werden, wenn der Lohn von der ausgebrachten Menge an "gutem Stahl" abhängig ist.

Sowohl chargenfixe als auch chargenvariable Produktivfaktoren können kontinuierlich oder diskontinuierlich teilbar sein. Kontinuierlich teilbar sind sie dann, wenn jede gewünschte Menge des Faktors i in das Modell eingeführt werden kann. Können dagegen nur bestimmte Quanten eingesetzt werden, wie z.B. ganze Ofeneinheiten, so ist der Fall diskontinuierlich teilbarer Faktoren gegeben.

b. Beschränkungen

Bei jeder Produktion gibt es

aa. prozeßbedingte und
bb. kapazitätsbedingte

Daten, die einer unbegrenzten Variation der einzusetzenden Produktivfaktoren oder der herzustellenden Produktquantitäten Grenzen setzen. Solche Beschränkungen können in Stahlwerken technischer, chemisch-physikalischer oder wirtschaftlicher Art sein, z.B. die Ofenkapazität, Einsatzbeschränkungen oder spezifischer Finanzbedarf.

aa) Prozeßbedingte Beschränkungen

Von prozeßbedingten Beschränkungen spricht man dann, wenn eine geforderte Ausbringung bestimmter Produkte sich mit gewissen Einsatzqualitäten oder -quantitäten nicht realisieren läßt. So sind z.B. beim Siemens-Martin-Prozeß gewisse Kohlenstoffgehalte im Ausgangsmaterial erforderlich, damit eine genügende Badbewegung, das sogenannte "Kochen" des Stahles, gewährleistet ist. Denn nur bei genügend starker Umwälzung des Bades ist eine Entschwefelung bzw. Entphosphorung des Einsatzes möglich. Andererseits sind für bestimmte Stahlqualitäten bestimmte Schrottsorten ausgeschlossen, weil sie z.B. zuviel Kupfer oder Zinn enthalten, welches sich bekanntlich im Siemens-Martin-Ofen nicht entfernen lassen.

bb) Kapazitätsbedingte Beschränkungen

Kapazitätsbedingte Beschränkungen beziehen sich nicht nur auf die Gesamtkapazität, sondern sind auch durch die Teilkapazitäten aller nur begrenzt verfügbaren Faktoren gegeben, die für die Erzeugung der j Produkte erforderlich sind. Diese Beschränkungen können

aaa, kapazitätsfix
bbb. chargenfix
ccc. chargenvariabel sein.

zu aaa) Kapazitätsfixe Beschränkungen sind beispielsweise gegeben durch das Fassungsvermögen der Schmelzöfen oder durch Aggregate, die nur bestimmte Zeit genutzt werden können, wie nur zeitweilig zur Verfügung st hende Transporteinrichtungen.

zu bbb) Einige Teiloperationen, die bei jeder Charge auftreten, können zeitlich begrenzt sein. Dann spricht man von chargenfixen Faktoren.

zu ccc) Chargenvariable Beschränkungen können werkstoffbedingt sein, es können aber auch Beschränkungen durch Normal- oder Überstundenkapazitäten in Betracht kommen.

An dieser Stelle sollen einige grundsätzlich Beispiele für Beschränkungen eingeführt werden, die für die nachfolgenden Modellbetrachtungen erhebliche Bedeutung haben.

Beispiel A [1)]

Zwei Stahlsorten S_1 und S_2 sollen in einem Schmelzaggregat A erschmolzen werden. Die jeweils erforderlichen Schmelzzeiten sind t_1 und t_2 Stunden pro Schmelze. Im Verlauf der Planungsperiode steht das Aggregat insgesamt T^1 Stunden zur Verfügung, weshalb die beiden Stahlsorten nur in begrenztem Umfang hergestellt werden können. Die Anzahl der Chargen soll mit x_1 und x_2 bezeichnet werden. Es ergibt sich:

$$t_1^1 x_1 + t_2^1 x_2 \leq T^1.$$

Bei der Produktion können keine negativen Produktquantitäten erzeugt werden, deshalb gilt weiter

$$x_1 \geq 0; \quad x_2 \geq 0 .$$

Je nach den Werten von t_1^1 und t_2^1 ergibt sich ein durch eine Gerade begrenztes Beschränkungsfeld (Fig. 8).

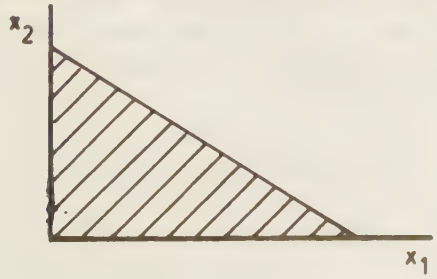

Fig.8

1) Vgl. Schneider, E., Einführung ..., a.a.O., S. 110. - Peters, B., a.a.O., S. 46 ff.

wenn mehr als zwei Produkte, nämlich die Produkte j, mit j = 1, 2, ..., m in k Schmelzaggregaten, z.B. nebeneinanderstehenden Öfen (k = 1, 2, ..., l) produziert werden, dann werden die verfügbaren Teilkapazitäten T^k bei gegebenen technischen Bedingungen t_j^k zusammengefaßt in

$$t_1^1 x_1 + t_2^1 x_2 + \ldots + t_m^1 x_m \leq T^1$$

$$t_1^2 x_1 + t_2^2 x_2 + \ldots + t_m^2 x_m \leq T^2$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$t_1^l x_1 + t_2^l x_2 + \ldots + t_m^l x_m \leq T^l$$

mit $x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \ldots, m)$.

Durch dies Gleichungssystem ist der Leistungsbedarf, nicht allein der Zeitbedarf, für jedes Produkt in den Spalten angegeben. In den Zeilen ist die genutzte und die zur Verfügung stehende Teilkapazität jedes Aggregates dargestellt.

Beispiel B [1]

Die Stahlsorten S_1 und S_2 werden in den Aggregaten A_1 und A_2 hergestellt. Das Aggregat A_1 kann maximal a_1 Chargen der Sorte S_1, das Aggregat A_2 [2] maximal a_2 Chargen der Sorte S_2 herstellen, dann muß jeweils eine Neuzustellung der Öfen erfolgen. Damit sind der Chargenanzahl feste Grenzen gesetzt: (Fig. 9)

$$x_1 \leq a_1 ; \quad x_1 \geq 0 ; \quad 0 \leq x_1 \leq a_1$$

$$x_2 \leq a_2 ; \quad x_2 \geq 0 ; \quad 0 \leq x_2 \leq a_2$$

1) Vgl. Schneider, E., Einführung ..., a.a.O., S. 109.

2) A_1 ist dabei z.B. ein Thomaskonverter, A_2 ein Siemens-Martin-Ofen.

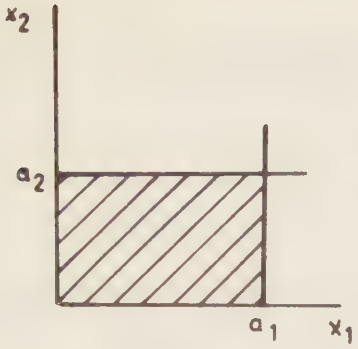

Fig.9

Beispiel C

Die in der Planungsperiode zur Verfügung stehende Zustellungszeit als Ausbesserungszeit betrage a_1 Stunden. Zum Ausbessern und Neuzustellen der Öfen sind jeweils die Zeiten t_{11} und t_{12} erforderlich. Bedeuten M_1 und M_2 die insgesamt pro Planungsperiode herzustellenden Gesamtproduktionsmengen, g_1 und g_2 die Chargengewichte in Tonnen, dann geben die Quotienten

$$\frac{M_1}{g_1} \quad \text{und} \quad \frac{M_2}{g_2}$$

die Häufigkeit der Ausbesserung bzw. Zustellung an. Diese Beschränkung wird in der Fig. 10 wie folgt dargestellt [1]:

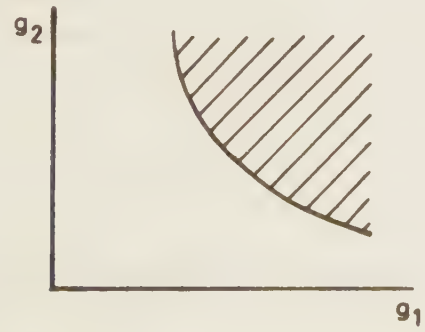

Fig.10

1) Churchman, C.W. et a., a.a.O., S. 245.

$$\frac{M_1}{g_1} t_{11} + \frac{M_2}{g_2} t_{12} \leq a_1$$

$$g_1 \geq 0 ; \quad g_2 \geq 0 .$$

Im Fertigungsbereich können innerhalb einer Produktionsstätte Beschränkungen in verschiedener Form existieren, auch mehrere Formen nebeneinander. Diese Formen können sich mitunter ausschließen. Durch Kombination der Beispiele A und C erhält man folgende Beschränkungsfelder [1]:

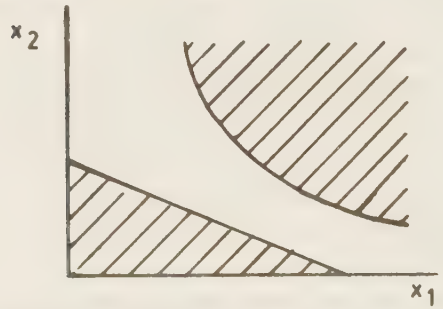

Fig. 11

Diese Felder schließen sich aus und ergeben somit eine unlösbare Situation. Darum läßt sich ganz allgemein ableiten, daß sämtliche Daten von gegebenen Beschränkungen ein gemeinsames Beschränkungsfeld einschließen müssen, wenn eine Produktion unter diesen Bedingungen überhaupt möglich sein soll [2].

Weiter ist gezeigt worden, daß die Beschränkungen sowohl in Form linearer als auch nichtlinearer Gleichungen oder Ungleichungen auftreten können. Für beide Möglichkeiten gibt es entsprechende Rechen- und Lösungsverfahren.

1) Curchman, C.W. et al., a.a.O., S 248.

2) Vgl. Churchman, C.W. et al., a.a.O., S. 247. - Vajda, S., Einführung in die Linearplanung und die Theorie der Spiele, München 1961, S. 25 ff.

c. Organisation des Fertigungsbereiches der Produktionsstätte

Die beiden möglichen Grundformen für das Fertigungsverfahren sind das Objektprinzip und das Verrichtungsprinzip [1]. Andere Einteilungen gehen weiter. So unterscheidet Mellerowicz [2] Fließ-, Strassen- oder Linien-, Gruppen- oder Gemischt- und Werkstattfertigung. Das Unterscheidungskriterium ist die Art der sachlichen Abstimmung der einzelnen Fertigungsstufen. Daneben treten aber auch noch andere Kriterien auf, wie die Funktionen bei der Werkstattfertigung. Aus diesem allen ergeben sich keine eindeutigen Gesichtspunkte für die Zuordnung zu dem einen oder anderen Verfahren. Daher soll hier nur die Unterscheidung nach verfahrens- und produktausgerichten Fertigungssystemen beibehalten werden. Entscheidend bei der verfahrensausgerichteten Fertigung oder "Fließfertigung" ist, daß der Ablauf durch die Organisation festgelegt ist und keine Wahlmöglichkeit besteht. Dabei muß die Fertigungszeit für die Arbeitsoperationen keine notwendig starre Größe sein, ein gleichmäßiger "Takt" ist keine unabdingbare Forderung. Beim produktausgerichteten Fertigungsverfahren oder Verrichtungsprinzip werden die unterschiedlichen Arbeitsoperationen jeweils in dafür bestimmten Abteilungen oder Teilbetrieben ausgeführt. Dabei kann die Reihenfolge der Operationen starr festgelegt sein oder auch nicht, die Zeitdauer der einzelnen Operationen kann konstant oder variabel sein. Nur in diesem Fall ergeben sich echte Ablaufplanungsprobleme.

Der technische Ablauf in Stahlwerken bedingt, daß der Fertigungsbereich, d.h. die organisatorische Anordnung der Betriebseinrichtungen, nach dem Verrichtungsprinzip

1) Vgl. Gutenberg, E., Grundlagen ..., a.a.O., S. 68. Gutenberg nennt diese beiden Grundformen Werkstattfertigung und Fließfertigung.

2) Mellerowicz, K., Betriebswirtschaftslehre der Industrie, a.a.O., S. 105 ff. - Vgl. Kalveram, W., a.a.O., S. 46 ff.

angeordnet ist [1]. Durchweg finden wir streng voneinander getrennte Schmelzbetriebe und Gießbetriebe, die jeweils mehrere Operationen durchführen können. Charakteristisch ist, daß der Durchlauf der herzustellenden Produktes, beim Stahlwerksbetrieb des abgegossenen Rohstahlblockes, zwangsweise vorgeschrieben ist. Variierbar ist dabei lediglich der zeitliche Ablauf, eventuelle Zwischenschaltung von Lagerungen (beim Arbeiten in einer Hitze ist dies ausgeschlossen) oder neuer Produktionsoperationen, z.B. Desoxydationsvorgänge im Ofen oder in der Pfanne, nicht aber die grundsätzliche Reihenfolge der anzuwendenden Verfahren. Ein Block kann, um es grob auszudrücken, nicht abgegossen werden, bevor die Charge eingesetzt und eingeschmolzen worden ist. Der Prozeß ist durch technologische Faktoren in seinem Ablauf streng determiniert. Dies ist eine der im Rahmen des Verrichtungsprinzipes möglichen Alternativen. Der Fall der Fließfertigung kann aus unserer Betrachtung herausgelassen werden.

d. Anzahl der Operationen

Die Anzahl der Operationen, die bei der Produktion der zu fertigenden Produkte j durchlaufen werden müssen, ist ein entscheidendes Datum für die Produktionsdurchführungsplanung. Je mehr solcher Operationen innerhalb einer Produktionsstätte auftreten, um so komplexer stellt sich dabei die Planung des Produktionsablaufes dar. Im Rahmen der Ablaufplanungsmodelle werden diese Operationen im angloamerikanischen Schrifttum als "jobs", im deutschen Schrifttum als "Arbeiten" bezeichnet.

1) Vgl. Gutenberg, E., Grundlagen ..., a.a.O., S. 75 ff.

Jedes der j zu fertigenden Produkte, welches in der Planungsperiode in der Produktionsstätte Stahlwerk hergestellt werden soll, durchläuft mehrere solcher Operationen, die möglicherweise durch Lagerpunkte getrennt sein können. Schematisch läßt sich der Produktionsablauf wie folgt darstellen (Fig. 12) :

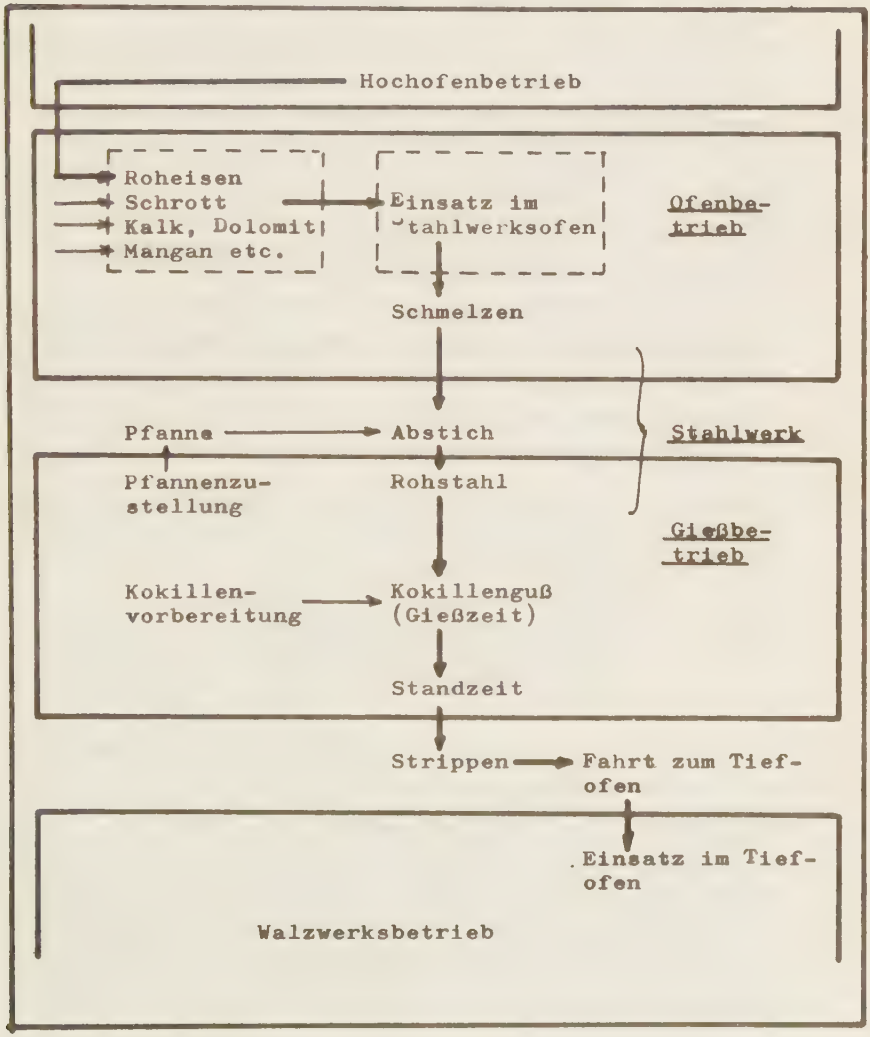

Fig. 12

Ein ähnliches Ablaufbild, jedoch unter Einbeziehung aller Hilfsausrüstungen, gibt Tocher [1]. Dieses sehr auf technische Einzelheiten auch der Hilfsaggregate eingehende Bild braucht hier nicht betrachtet zu werden. Mehr als die in Fig. 12 eingezeichneten Aggregate lassen sich jederzeit in das Modell einfügen. Durch Zusammenfassung einiger Teiloperationen läßt sich aber die Ablaufplanung erheblich vereinfachen. Bei langfristiger Planung, wo es auf die Dimensionierung aller Aggregate ankommt, wird eine Ausweitung der Modelle im Sinne von Tocher notwendig sein. Das ist aber dann ein Fall der Investitionsplanung oder Kapazitätsplanung, während wir uns hier auf die Produktionsplanung beschränken wollen, wobei die Kapazitäten festliegen und die technische Einrichtung durch Beschränkungsgleichungen zu berücksichtigen sein wird.

Nach Fig. 12 werden vier Grundoperationen im Stahlwerk unterschieden:

aa. Bereitstellen der Werkstoffe
bb. Einsetzen und Schmelzen
cc. Gießen und Erstarren
dd. Strippen und Übergabe an den Tiefofenbetrieb.

Die Folge der Operationen liegt fest und ist nicht variierbar. Für die Produktionsplanung ergibt sich bei 1 im Betrieb befindlichen Aggregaten, folglich 1 parallel hergestellten Produkten, das Problem der zeitlichen Abstimmung der vorhandenen Kapazitäten der einzelnen Betriebsteile unter Minimierung der Leerzeiten. Das ist aber das bekannte Reihenfolgeproblem, auch Zeitplanungsproblem genannt.

1) Tocher, K.D., a.a.O., S. 60.

e. Arten des Materialflusses

Ebenso wie der Einsatz der Produktivfaktoren und wie das Produktausbringen kann auch der Materialfluß während des Prozesses

aa. kontinuierlich oder
bb. diskontinuierlich sein.

zu aa) Kontinuierlicher Materialfluß findet sich bei verfahrensausgerichteten Fertigungssystemen nur in seltenen Fällen. Er liegt dann vor, wenn von einer Operation zur anderen ohne Unterbrechung durch Lagerungen ein fortlaufender Materialfluß stattfindet. Durch die Arbeit in Chargen ist ein solcher kontinuierlicher Fluß im Stahlwerksbetrieb nicht gegeben.

zu bb) Wenn eine fertigungstechnische Einheit " ... von Beginn bis zur Beendigung der Bearbeitung als eine geschlossene Einheit von Arbeitsplatz zu Arbeitsplatz wandert ..." [1], dann liegt diskontinuierlicher Materialfluß vor. Diese Einheitlichkeit braucht dabei nicht in allen Teilen gegeben sein, es genügt, wenn sie zwischen zwei Operationen auftritt. Dadurch ist bereits diskontinuierlicher Materialfluß gegeben. Bei einer Chargenfertigung ist dieser Fall immer im Vordergrund, und im Stahlwerksbetrieb haben wir es mit einer solchen Produktion in Chargen zu tun.

f. Einfluß der Durchlaufzeit

Für eine Charge des Produktes j im Stahlwerk ist die Durchlaufzeit t_j die Summe aller Bearbeitungs-, Transport- und Standzeiten vom Einsatz in den Ofen bis zur Abgabe an die nachfolgende Produktionsstufe oder, falls Rohstahlblöcke verkauft werden, den Absatz. Der Fall der Momentanproduktion, für den $t_j \approx 0$ gilt, ist für

1) Gutenberg, E., Grundlagen ..., a.a.O., S. 165.

das Stahlwerk unrealistisch und soll hier nicht betrachtet werden. Bei einer zeitbedingten Produktion gilt $t_j >> 0$. Eine Berechnung der gesamten Durchlaufzeit bei diskontinuierlichem Materialfluß stößt auf Schwierigkeiten, besonders dann, wenn die Bearbeitungszeiten nur relativ ungenau geplant werden können, es aber unsicher ist, ob diese Planwerte im praktischen Betrieb auch eingehalten werden können. In vielen Fällen können für die zeitliche Beanspruchung der einzelnen Aggregate nur Wahrscheinlichkeits- bzw. Durchschnittswerte in der Planung angesetzt werden. Es sind oftmals unübersichtlich viele Störfaktoren gegeben, die zum Teil einer Quantifizierung nicht zugänglich sind, wie etwa der Zustand der Ofenauskleidung, welcher auf den Temperaturverlauf der Schmelze einen starken Einfluß ausübt, damit aber auch auf die Dauer der Schmelzung und die gesamte Durchlaufzeit der Charge.

Wenn hier vom "Faktor" Zeit gesprochen wird, so ist damit selbstverständlich nicht ein Produktionsfaktor gemeint, wie der Werkstoff oder die menschliche Arbeit. Der Einsatz der Produktionsfaktoren ist aber in irgend einer Weise in den meisten Fällen eine zeitabhängige Größe, wenn deren Einfluß auf die Zielgröße, die Kosten des Betriebes, betrachtet werden. Es gibt nur sehr wenige Faktoren, deren Kosteneinfluß im Stahlwerk unabhängig von der Zeitdauer ihres Einsatzes ist, die also rein proportionale oder fixe Faktoren sind.

Es wird im Folgenden von einem Betrieb mit k Schmelzaggregaten ($k = 1, 2, \ldots, l$) ausgegangen, die alle eine gegebenen Kapazität besitzen, welche nicht unbedingt gleich sein muß für alle Teilkapazitäten. Die für die Planungsperiode T vorliegenden gesamten Aufträge M_j der j Produkte ($j = 1, 2, \ldots, m$) können

bei gleicher Kapazität der Aggregate für jedes einzelne Produkt j durch die Kapazität dividiert werden und man erhält die Anzahl der Chargen, die für das betreffende Produkt in der Periode T erforderlich sind. Bezeichnen wir mir x_j^k die Chargenanzahlen für das Produkt j im Aggregat k, dann ergibt sich die gesamte Produktionsmenge in der Periode T zu

$$M_j = \sum_{k=1}^{l} (s^k x_1^k + s^k x_2^k + \ldots + s^k x_m^k) = \sum_{k=1}^{l} \sum_{j=1}^{m} s^k x_j^k$$

mit $x_j^k \gtrless 0$.

Auf grund der technischen und technologischen Gegebenheiten ergeben sich für den Betrieb unterschiedliche Schmelzzeiten für die verschiedenen Produkte. Diese Zeiten werden durch spezielle Untersuchungen an Werten der Vergangenheit ermittelt, unter Berücksichtigung möglicher Entwicklungstrends, und werden der Produktion als Planzeiten vorgegeben. Bezeichnen wir die erforderliche Schmelzzeit für das Produkt j im Aggregat k mit t_j^k, so erhalten wir diegesamte erforderliche Schmelzzeit im Aggregat k mit

$$T^k = t_1^k x_1 + t_2^k x_2 + \ldots + t_m^k x_m = \sum_{j=1}^{m} t_j^k x_j \quad .$$

Die gesamte verfügbare Schmelzzeit für alle vorhandenen Aggregate k ergibt sich entsprechend zu

$$T_{ges.} = T^1 + T^2 + \ldots + T^l = \sum_{k=1}^{l} T^k =$$

$$= \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} t_j^k x_j \quad .$$

Die Schmelzzeit T^k ist dabei nicht als die Kalenderzeit T^K der Periode T zu verstehen, da von dieser die Zeiten für Kalt- und Warmreparaturen an den Aggregaten, T^R, soweit sie im Plan berücksichtigt werden kön-

nen und müssen, abgezogen werden [1]:

$$T_{ges.} = T^K - T^R \quad , \quad \text{mit} \quad T = T^K.$$

Der bei der dem Plan zugrunde liegenden Auftragslage erforderliche Zeitbedarf T^E, wiederum mit geplanten Zeitwerten, die empirisch festgestellt werden, beträgt:

$$\begin{aligned} T^E = {} & t_1^1 x_1^1 + t_1^2 x_1^2 + \ldots + t_1^l x_1^l + \\ & + t_2^1 x_2^1 + t_2^2 x_2^2 + \ldots + t_2^l x_2^l + \\ & + \ldots\ldots\ldots + \\ & + t_m^1 x_m^1 + t_m^2 x_m^2 + \ldots + t_m^l x_m^l = \\ = {} & \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} t_j^k x_j^k \end{aligned}$$

$(j = 1, 2, \ldots, m; \quad k = 1, 2, \ldots, l).$

Dabei wird gefordert, daß die verfügbare Schmelzzeit ausreicht, um die geplante Produktion durchzusetzen, also

$$T^E \leq T_{ges.}$$

Die Schmlezzeit für eine Charge des Produktes j im Aggregat k setzt sich aus verschiedenen "Teilzeiten" zusammen. Als solche seien genannt [2]:

---

1) Vgl. Rjabinki, B.J., Die Planung der Produktion in Hüttenwerken, Band 1, Übersetzung aus dem Russischen, Berlin 1951, S. 131. Diese Teilzeiten sind hier, wo als Maß der Kapazität die verfügbare Schmelzzeit angegeben wird, als Teilkapazitäten zu verstehen.

2) Diese Aufstellung ist nur eine Möglichkeit der Unterteilung der Zeiten und ist weder vollständig noch in jedem Stahlwerk in dieser Form anwendbar.

aa. Ausbessern dew Ofens
bb. Beschicken des Ofens
cc. Einfüllen des Roheisens
dd. Einschmelzen
ee. Kochen und Fertigmachen
ff. Abstechan der Schmelze
} Chargendauer

gg. Abstehenlassen in der Pfanne
hh. Gießen
ii. Standzeit in der Kokille
} Gießdauer

jj. Strippen
kk. Fahrt zum Tiefofen und Übergabe.

Werden diese Teilzeiten mit t^t bezeichnet ($t = 1, 2, ., s$) (im vorliegenden Fall also $s = 11$), so ergibt sich für

$$T^k_{j,ges.} = t^{k1}_j + t^{k2}_j + \ldots + t^{ks}_j = \sum_{t=1}^{s} t^{kt}_j$$

für das Aggregat k und das Produkt j. Die gesamte Durchlaufzeit ist dann aber

$$T_j = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \sum_{t=1}^{s} t^{kt}_j \quad .$$

Einige dieser Zeitabschnitte t^t sind dabei von der Stahlsorte, dem Produkt j, abhängig. Für diese gilt

$$t^{kt}_j = f(x_j) \quad .$$

Andere Zeiten, wie etwa das Ausbessern des Ofens, sind von der Sorte annähernd unabhängig und stellen einen für jede Stahlqualität annähernd konstanten Zeitbedarf dar. Dies ist aber in den verschiedenen Stahlwerken unterschiedlich, so daß hier keine konstante Größe berücksichtigt werden muß. Es wird also unterstellt, daß alle t^t als Funktion des jeweiligen Produktes x_j dargestellt werden können [1].

1) Werden konstante Größen berücksichtigt, so ergibt das nur eine unwesentliche Änderung des Modellansatzes. $T_{ges.}$ wäre dann

$$T_{ges.} = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \sum_{t=1}^{s} t^{kt}_j + \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} t^{k}_j .$$

7. Der Betriebsgesamtzusammenhang

Das Stahlwerk ist, wie bereits beschrieben, mit vor- und nachgeschalteten Produktionsstufen eng verbunden. Dabei soll unterstellt werden, daß an den übernommenen Produkten der Vorstufe (Hochofen) und an den an die nachgeschaltete Stufe des Walzwerkes abgegebenen qualitativ, quantitativ und kostenmäßig keine Veränderungen vorgenommen werden sollen. Das bedeutet, daß in jeder Hinsicht der Output der Vorstufe gleich dem Input des Stahlwerks und dessen Output gleich dem Input der Nachstufe sind. Damit sind auch Lagerungen zwischen den Produktionsstufen ausgeschlossen, sowie sämtliche technologischen Manipulationen. Auf diese Weise wird einescharfe Abgrenzung der Produktionsstufen erreicht, weil sonst eine exakte Produktionsplanung von vorn herein unmöglich wäre.

Art, Menge und Zeitpunkt der jeweiligen Übergabe sind durch den Bedarfsplan und das Produktionsprogramm des hier als Hauptbetrieb betrachteten Stahlwerksbetriebes eindeutig festgelegt. Dabei können dir Güter

a. lagerfähig
   aa. unbeschränkt lagerfähig
   bb. beschränkt lagerfähig
b. nicht lagerfähig

sein.

Unbeschränkt lagerfähig sind solche Güter, die kalt eingesetzt werden. Das sind im allgemeinen die verschiedenen Schrottsorten, kaltes Roheisen, aber auch Erz, Kalk und Dolomit und Legierungselemente. Beschränkt lagerfähig, allerdings maximal für Stunden, ist das flüssige Roheisen des Hochofens, soweit es in verschlossenen Pfannen angeliefert wird. In dem Fall, wo dem Stahlwerksbetrieb ein Roheisenmischer vorgeschaltet ist,

kann unter entsprechendem Energieaufwand, damit aber Kostenanfall, für das Roheisen von unbeschränkter Lagerfähigkeit gesprochen werden. Nicht lagerfähig sind die abgestochenen Chargen in der Stahlpfanne, aber auch die abgegossenen Rohstahlblöcke, wenn, wie es hier getan werden soll, das Arbeiten in einer Hitze der Produktionsplanung als Grundforderung zugrunde liegt.

Durch die beschränkte oder ganz ausgeschaltete Lagerfähigkeit der Produkte ist ein enger zeitlicher Kontakt zu den anderen Produktionsstufen notwendig, auf welchen bei der Planung Rücksicht genommen werden muß.

Das vom Hochofenbetrieb übernommene Roheisen wird abstichweise, d.h. aber auch chargenweise, in einer Pfanne angeliefert. Diese Charge ist kontinuierlich teilbar, das bedeutet, daß das Roheisen in beliebiger Teilmenge auf eine oder mehrere Chargen verteilt werden kann, wenn direkt, ohne Einschaltung eines Mischers, eingesetzt wird. Die einzelnen Stahlblöcke dagegen sind bei der Übergabe an das Walzwerk diskontinuierlich teilbare Quantitäten. Die Auslieferung an das Walzwerk erfolgt in der Regel chargenweise in Blöcken ganz bestimmter Art und Abmessung, je nach den zugrunde liegenden Aufträgen.

Ein Verkauf von Rohstahlblöcken ist relativ selten. Deshalb kann von diesem Fall hier abgesehen werden, und es wird angenommen, daß die gesamte Produktion des Stahlwerkes an das eigene Walzwerk abgegeben wird, und zwar als geschlossene Charge. Daß es im praktischen Betrieb vorkommen kann, daß aus verschiedenen Gründen einzelne Blöcke einer Charge abgesondert werden und als sogenannte "Nachläufer" weitergehen, braucht bei der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt zu werden. Bei der Übergabe an das Walzwerk spielt der

Zeitfaktor eine wesentliche Rolle. Nach dem Abguß müssen die Rohstahlblöcke eine bestimmte Zeit t_{sj} (Standzeit) noch in der Kokille stehen, damit der Stahl im Inneren erstarren kann, da es sonst Schwierigkeiten beim Walzen und Verschlechterungen der technologischen Eigenschaften geben kann. Der Wärmeverlust in dieser Zeit ist relativ gering, da das Kokillenmaterial die Wärme staut. Nach dem dann erfolgenden Strippen der Kokillen wird die Oberfläche des Stahlblockes freigelegt und es folgt eine schnelle Abkühlung, damit ein Wärmeverlust. Da das Arbeiten in einer Hitze angestrebt werden soll, muß nach dem Strippen der Einsatz in den Tiefofen schnell erfolgen, da dann ein geringerer Energieverbrauch für das Aufheizen auf die gewünschte Walztemperatur erforderlich ist. Die Standzeiten im Tiefofen werden abgekürzt und damit ist auch die Tiefofenkapazität besser ausgelastet.

Wir wollen davon ausgehen, daß für jedes Produkt j eine obere und untere Grenze für die Standzeit t_{sj} festgelegt ist. Diese Zeit kann variiert werden, je nachdem, ob Tiefofenkapazität frei ist, da eine verlängerte Standzeit in der Kokille nicht sehr große Wärmeverluste bringt. Ein Minimum der Standzeit kann wegen der Erstarrungsvorgänge nicht unterschritten werden, ein Maximum ist ebenfalls gegeben durch die Gefahr, daß die Blöcke in der Kokille "einfrieren" und nicht mehr gestrippt werden können. Die anderen darauf folgenden Zeiten, wie Transportzeit zum Tiefofen usw. sollen so gering wie möglich gehalten werden, um die Wärmeverluste nicht unnötig zu vergrößern.

Mit der Übergabe der Charge an den Tiefofen ist das Produkt aus dem Stahlwerksbereich ausgeschieden und

in den Walzwerksbereich eingetreten. An dieser Stelle bricht diese Untersuchung ab.

8. Die Kosten der Produktion

Jede betriebliche Produktionsplanung hat ein bestimmtes Ziel. Diesem Ziel entspricht eine Zielfunktion. Wenn unterstellt wird, daß den im III. Teil dieser Arbeit zu definierenden Modellbetrieben das Prinzip der Gewinnmaximierung zugrunde liegt, so können diese Gewinnmaximierung oder die Minimierung der Produktionskosten die Zielfunktion darstellen. Mit

$$G = U - C ,$$

wobei G = Gewinn, U = Umsatz und C = Kosten bedeuten, kann mit einer Minimierung der Kosten gleichzeitig eine Maximierung des Gewinnes erreicht werden und umgekehrt [1]. Bei auftragsorientierten Betrieben ist der Umsatz U eine gegebene Größe, wenn die Preise der Produkte als unabhängig von der ausgebrachten Menge angesehen werden können. In der Regel sind bei Auftragsannahme auch schon die Preise festgelegt. Es ist

$$U = P_j X_j = \sum_{j=1}^{m} p_j x_j ,$$

d.h. Umsatz = Preis mal Menge der Produkte j.

In aller Regel sind die Aufträge so weit spezifiziert, daß die Mengen und die Verkaufspreise für die Planung fest vorgegebene Daten bilden. Vom Umsatz ist ein

1) Vgl. Förstner, K. und Henn, R., Dynamische Produktionstheorie und Lineare Programmierung, Meisenheim 1957, S. 27 ff. , Schneider, E., Einführung ..., a.a.O., S. 229.

minimaler Kostenbetrag in Abzug zu bringen, damit der Gewinn maximal wird [1]:

$$G = \sum_{j=1}^{m} p_j x_j - \sum_{j=1}^{m} c_j x_j = \sum_{j=1}^{m} (p_j - c_j) x_j .$$

Es ist also der Maximalgewinn gegeben dadurch, daß von einer konstanten Größe U ein minimaler Kostenbetrag abgezogen wird. Der Umsatz U ist hierbei lediglich eine Proportionalitätskonstante.

Wenn hier von Kosten gesprochen wird, so ist damit "... der (in Geld) bewertete Verzehr von Gütern und Dienstleistungen, der für die Erstellung betrieblicher Produkte erforderlich ist ..." [2] und sich auf den geplanten Produktionsstättenbereich bezieht, gemeint. Dabei wird nicht von den Istkosten ausgegangen, sondern es sind "... unter Kosten 'Plandaten' verstanden, deren Gültigkeit wir für die Dauer der betreffenden Planungsperiode annehmen müssen ..." [3]. Je kürzer dabei die Planungsperiode ist, umso weniger ist eine Abweichung von diesen Daten zu erwarten, da in die Kostengröße auch die Preise der Faktoren eingehen. Diese Konstanz der Kosten darf nicht mit dem Begriff der fixen Kosten verwechselt werden, die nicht zeitbezogen sondern kapazitätsbezogen sind.

Die Kosten der Produktionsstätten als Summe aus Produktionskosten und Lagerkosten, können, entsprechend

---

1) Es sei hier auf die Zusammenhänge zwischen Linearer Programmierung und der Direktkostenrechnung (Direct Costing) hingewiesen, ohne daß diese Zusammenhänge hier dargestellt werden können. Vgl. dazu: Böhm, H.H., "Die Wertzurechnung der nichtlinearen Programmierung", Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 29, 1959, S. 129 ff. und S. 208 ff. - Böhm, H.H. und Wille, F., Direct Costing und Programmplanung, München 1960. - Dies sind nur Beispiele aus der sehr umfangreichen vorhandenen Literatur zu diesem Komplex.

2) Kilger, W., Produktions- und Kostentheorie, in: Die Wirtschaftswissenschaften, Wiesbaden 1958, S. 17. - Vgl. Gutenberg, E., Grundlagen ..., a.a.O., S. 228. - Schneider E., Einführung ..., a.a.O., S. 96. - Rummel, K. a.a.O., S. 76.

3) Peters, B., a.a.O., S. 37.

der Einteilung der Produktivfaktoren, jeweils in beschäftigungsfixe, chargenfixe und chargenvariable Kosten gegliedert werden. Die Schwierigkeiten in der Praxis, die Kostenwerte exakt zu bestimmen, so daß oftmals nur Kostenschätzungen auf stochastischer Grundlage vorgenommen werden können, können in dieser Arbeit nicht betrachtet werden, da es zu weit führen würde, Aussagen über die Herkunft und Ermittlung der Kostenwerte zu machen. Es wird daher vorausgesetzt, daß die Kostendaten, bezogen auf die jeweilige Produktion, bereits vorliegen.

a. Beschäftigungsfixe Produktionskosten

Kosten, die bei Beschäftigungsvariation, d.h. bei Produktmengenänderungen, sich konstant verhalten, sind beschäftigungsfixe Produktionskosten. Diese sind lediglich zeitabhängig. Beispiele solcher zeitbezogener Kosten sind Zinsen auf das investierte Kapital, zeitabhängige Abschreibungen auf Anlagen, Gehälter von leitenden Angestellten und Meistern, Raumkosten usw. Die Zeit ist ein wesentlicher Variationsparameter der Produktionsplanung, deshalb spielen diese zeitbezogenen Kosten eine entscheidende Rolle. Da die Chargendauer bei spezifischer Einsatzzusammensetzung konstant ist [1], ist es angebracht, die Kosten auf ein entsprechendes Zeitmaß zurückzuführen. Für ein spezielles Schmelzaggregat, welches T^k Stunden in der Periode eingesetzt werden soll, bedeutet das, daß die Kosten der Periode auf die Einheit eine Stunde umgerechnet werden. Dabei erhält man die Kosten des Einsatzes dieser Ofeneinheit in (DM/h). Ist dann t_j^k, die Chargendauer für das Produkt j um Aggregat k, gegeben,

1) Diese Zusammenhänge werden noch eingehend an späterer Stelle darzustellen sein.

so ist der entsprechende Faktor mit c_t^k, den Kosten einer Zeiteinheit im Aggregat k, zu multiplizieren, wobei man die zeitabhängigen Kosten einer Cahrge erhält zu $t_j^k c_j^k$.

b. Chargenfixe Produktionskosten

Entstehen Kosten, die der Anzahl der Chargen des Produktes j proportional sind und die für jede dieser Chargen in immer der gleichen Höhe anfallen, so sind dies chargenfixe Kosten. Mit zunehmendem Chargengewicht verhalten sich diese den Stückkosten entsprechenden "Tonnenkosten" in (DM/t) degressiv.

Die hier angesprochenen Kostenarten sind in der Literatur unter der Bezeichnung losfixe Kosten [1] ausführlich behandelt und zusammengestellt worden. Im Stahlwerksbetrieb sind dies Kosten für regelmäßige Reparaturen des Mauerwerks, z.B. Auflegen einer neuen Dolomitschicht auf den Herd des Siemens-Martin-Ofens, weiter Kosten der Arbeitsvorbereitung, Kosten des Abstiches, Gießkosten, Kosten der Kontrolle des Betriebsablaufes in physikalischer und chemischer Hinsicht, Kosten der Verwaltung ganz allgemein. Von diesen chargenfixen Kosten sind die "Grundkosten" [2] zu unterscheiden, welche für jedes Produkt, hier also für jede Stahlqualität, nur einmalig auftreten. Dies sind vor allem Entwicklungs- und Einführungskosten dieser speziellen Qualität. Diese Grundkosten sind insgesamt fix, auf die Tonne bezogen haben sie einen degressiven Verlauf. Rechnungstechnisch können sie ähnlich den Ab-

1) Vgl. Peters, B., a.a.O., S. 59. - Schäfer, E., "Losgröße und Kostengestaltung", Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 8, 1931, S. 824 ff. - Wolter, A.M., "Das Problem der Wirtschaftlichkeit bei der industriellen Sortenproduktion", Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, Jg. 31, 1937, S. 389 ff. - Voß, H., "Die Kostengestaltung bei schwankendem Umsatzprozeß in Papierfabriken", Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, Jg. 25, 1931, S. 40 ff. - Rummel, K., a.a.O., S. 23.

2) Vgl. Hennig, K.W., a.a.O., S. 47 ff.

schreibungen auf Anlagen erfaßt werden. Wir wollen diese Grundkosten im Folgenden nicht beachten.

Bezogen auf das herzustellende Produkt j sollen die chargenfixen Produktionskosten mit C_j (DM/Charge) bezeichnet werden. Sind für k Aggregate chargenfixe Kosten gegeben, die getrennt erfaßt werden, so gilt

$$C_j = \sum_{k=1}^{l} c_j^k .$$

C_j kann bei unseren Überlegungen auch den Wert Null annehmen, ohne daß dies die Betrachtungen der Produktionsplanung stört.

c. Chargenvariable Produktionskosten

Diejenigen Kosten, welche innerhalb des Fertigungsbereiches einer Produktionsstätte für die Planungsperiode ausschließlich eine Funktion der ausgebrachten Produktquantitäten oder der eingesetzten Produktionsfaktormengen sind, werden als losvariable, bei Chargenproduktion als chargenvariable Produktionskosten bezeichnet. Die Kostenfunktion ist gegeben durch $C = b \cdot f(x)$. Dabei kann $C = f(x)$ eine lineare oder auch nichtlineare Abhängigkeit ausdrücken.

Bei linearen Kostenverläufen mit $C = a + bx$, bzw., wenn die chargenfixen Produktionskosten außer Acht gelassen werden, $C = bx$, ist das Verhältnis Kosten zu Mengeneinheit der einzusetzenden Faktoren jederzeit bekannt. Beispiele hierfür sind Materialkosten, mengenbezogene Energiekosten und Lohnkosten [1].

1) Vgl. Rummel, K., Grundlagen der Selbstkostenrechnung, Düsseldorf 1939, S. 42 ff. - Magee, J.F., Production Planning and Inventory Control, New York-Toronto-London 1958, S. 25,

Nichtlineare Kostenverläufe sind dann gegeben, wenn die Faktorpreise eine Funktion der einzusetzenden Faktormengen sind. Dabei sollen die Faktorqualitäten als gleichbleibend vorausgesetzt werden. Ein Beispiel für diese Art von Kosten kann z.B. der Roheiseneinsatz im Stahlwerk sein, wenn der Hochofenbetrieb seine Verrechnungspreise auf Grund von abgegebenen Mengen berechnen kann. Es können aber auch konstante Verrechnungspreise angesetzt werden, unabhängig von der gelieferten Menge. Dann liegen wieder lineare Verhältnisse vor.

Sowohl die linearen als auch die nichtlinearen Kostenverläufe können, je nach den Preis - Mengen - Verhältnissen, kontinuierlich oder diskontinuierlich verlaufen. Diskontinuierlich ist der Verlauf dann, wenn bestimmte Preise jeweils für einen gewissen Mengenbereich gelten, im vorhergehenden oder nachfolgenden Mengenbereich sich aber sprunghaft nach oben oder unten ändern.

Die Gesamtkosten im Stahlwerk sind eine sehr komplexe Größe, auf die verschiedene, mitunter sehr viele Einflüsse wirken. Die Erfassung dieser Einflüsse in ihrer Wirkung auf die Kosten der Produktion ist oft nur unter erheblichen Schwierigkeiten technischer und rechnerischer-statistischer Art möglich. Es kann aber grundsätzlich unterstellt werden, daß die Kosteneinflußgrößen in ihrem funktionalen Zusammenhang exakt feststellbar und formelmäßig, tabellarisch oder graphisch dargestellt werden können. Dabei ist unter exakter Zurechnung zu verstehen nicht eine eindeutige, ursachgemäße Zurechnung, sondern gemeint ist, daß der Planung genau spezifizierte Zahlenwerte zugrunde gelegt werden. Der

Einflußgrößenrechnung im Stahl werk widmet Hall [1] eine eingehende Untersuchung, auf die hier Bezug genommen werden soll, soweit es die Rechenverfahren betrifft. Grundsätzlich soll in dieser Arbeit unterstellt werden, daß der Kostenverlauf und die Abhängigkeit von den verschiedenen Einflußgrößen von vorn herein bekannt sind und demnach Plandaten darstellen. Nicht die Feststellung der Einflußgrößen sondern die Planung der Produktion auf Grund gegebener Kostenverläufe ist Gegenstand dieser Arbeit.

Die Gesamtkosten im Stahlwerk setzen sich zusammen aus den Kosten der einzelnen aufeinander folgenden Produktionsstufen bzw. Arbeitsoperationen und den Kosten der Nebenanlagen. Da voraussetzungsgemäß keine Lager an Fertigprodukten im Stahlwerk gehalten werden, treten keine Lagerkosten auf. Als Ziel der Produktionsplanung wird die Maximierung des Gewinnes, damit gleichzeitig aber die Minimierung der Produktionskosten angestrebt. Daher ist die Produktionsplanung weitgehend von den Kosten der Produktion abhängig unter Berücksichtigung anderer technischer oder technologischer Beschränkungen. Da eine Minimierung der Kosten der einzelnen Teilbereiche wegen des Gesamtzusammenhanges aller Bereiche und der gegenseitigen Interdependenz nicht notwendigerweise das absolute Minimum für C sein muß, soll hier der Weg gegangen werden, von vorn herein auf die Kosten des Gesamtbetriebes abzustellen [2].

Allgemein liegt also das Problem vor, eine Kostenfunktion als Funktion der ausgebrachten Chargen des Pro-

1) Hall, R., a.a.O.

2) Vgl. Rummel, K., inheitliche Kostenrechnung, a.a.O., S. 176. - Rjabinki, B.J., a.a.O., S. 112. - Mellerowicz, K., Kosten ..., a.a.O., S. 225. - Littmann, H.E., "Stahlwerk", in: Handwörterbuch der Betriebswirtschaftslehre, 3. Band, 1960, Spalte 5024 ff.

duktes j im Aggregat k zu minimieren. Minimiere

$$c_j = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} f_j^k(x_j^k)$$

unter bestimmten, später zu beschreibenden, Nebenbedingungen.

Soll ein vollständiges gemischtes Hüttenwerk betrachtet werden ist es zweckmäßig, zunächst die einzelnen Teilbetriebe zu betrachten. Auf Einzelheiten dieser hier nur angedeuteten Möglichkeit soll aber nicht eingegangen werden, da das außerhalb des Rahmens der vorliegenden Arbeit fällt. Es soll nur auf die Möglichkeit einer solchen Globalerfassung an dieser Stelle aufmerksam gemacht werden [1].

1) Vgl. Fabian, T., a.a.O., S. 415 ff.

III. Teil

MATHEMATISCHE FORMULIERUNG VON PRODUKTIONSPLANUNGS-PROBLEMEN IN STAHLWERKEN

In diesem Teil der vorliegenden Untersuchung werden die Produktionsplanungsprobleme in Stahlwerken mathematisch formuliert. Dabei muß grundsätzlich wiederholt werden, worauf bereits in der Einleitung hingewiesen worden ist, daß nämlich eine Erfassung aller speziellen Probleme praktisch vorhandener Stahlwerke im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich sein kann. Es sollen nur die typischen Datenkonstellationen herausgearbeitet werden. Die angegebenen Modelle stellen sich ganz allgemein als Produktionsplanungsmodelle bei Chargenproduktion dar [1]. Dieser Tatbestand wird am Modell des Stahlwerks exemplarisch erarbeitet. Dabei ist es unsere Absicht, an einem konkreten Beispiel zu zeigen, wie solche und ähnliche Fälle der Chargenproduktion in bezug auf die Produktionsplanung erfaßt werden können. Die im Folgenden vorgeführten Modelle sind demnach wohl an dem Stahlwerksbetrieb orientiert, sollen aber dennoch so allgemein gehalten werden, daß auch für andere Probleme Lösungsmöglichkeiten aufgewiesen werden.

In einem ersten Kapitel soll die Planung des Produktionsprogrammes konkret dargestellt werden. Darauf aufbauend wird im zweiten Kapitel die Vollzugsplanung zu beschreiben sein. In einem dritten Kapitel sollen dann die Zusammenhänge dieser beiden Planungsaufgaben auf Grund der formulierten Modelle kurz untersucht werden,

1) Bei Produktionsplanungsmodellen für den ganz allgemeinen Fall der Chargenproduktion werden andere Bestimmungsfaktoren maßgebend sein. Die danach gebildeten Modelle hätten daher dann auch andere Aufgaben zu erfüllen und würden dementsprechend eine andere Form erhalten müssen.

wobei auf die Möglichkeiten aufmerksam gemacht werden soll, wie die Teilpläne zu einem Gesamtplan zusammengefaßt werden können. In einem abschließenden vierten Kapitel soll dann kurz auf die Verfahren eingegangen werden, mit denen die formulierten Modelle gelöst werden können. Da es nicht Sinn dieser Arbeit sein kann, alle Einzelheiten auf auftretenden Sonderfälle der Verfahren zu beschreiben, werden nur einführende Angaben gemacht werden und im übrigen ist auf die reichlich vorhandene Literatur hinzuweisen.

A. PRODUKTIONSPROGRAMMPLANUNGSMODELLE

Wenn hier Modelle für die Produktionsprogrammplanung aufgestellt werden, dann verstehen wir darunter die Produktionsprogrammplanung in engerem Sinne [1], d.h. die Planung, welche Produkte in welchen Mengen in welchen Aggregaten mit welchen Einsatzfaktoren hergestellt werden sollen. Dabei wird von folgenden Voraussetzungen ausgegangen:

1. Es soll von einer gegebenen Kapazität des Gesamtbetriebes einschließlich aller Teil- und Hilfsaggregate ausgegangen werden. Dabei werden auch für die Transport- und Beschickungsanlagen Maximalleistungen angenommen, die nicht überschritten werden können. Offen gelassen ist, ob diese Leistungen im technischen Sinn kontinuierlich oder diskontinuierlich teilbar sind.

2. Die Kapazitäten der Vor- und Nebenbetriebe, die Leistungen an den betrachteten Hauptbetrieb, hier das Stahlwerk abgeben, sollen gleichfalls bekannt und als optimal ausgenutzt angenommen werden. Damit

1) Vgl. Ellinger, T., a.a.O., S. 17 .

sind sowohl Einsatzstoffe wie Roheisen vom Hochofen, als auch Hilfs- und Betriebsstoffe, Energie und Zusatzstoffe in jeglicher Form exakt begrenzt. Eine Überschreitung der von diesen Betrieben geplanten und zur Verfügung gestellten Faktormengen soll ausgeschlossen sein, worauf die Nebenbedingungen der Modelle Rücksicht zu nehmen haben.

3. Die Mengen der Produktivfaktoren, über die in der Planperiode verfügt werden kann, sind bekannt.

4. Die Produktion soll nicht auf Lager erfolgen, sondern auf Grund von vorhandenen und als ausreichend anzunehmenden oder mit gegebener Wahrscheinlichkeit zu erwartenden Produktionsaufträge vorzunehmen sein. Dabei sind die Aufträge so weit spezifiziert, daß Produktionsverfahren, geforderte Qualität, Gewicht und Abmessung bekannt sind. Unter Qualität soll hier die Gesamtheit technologischer, technischer, chemischer und physikalischer Daten verstanden werden. Als Ausdruck dieser Daten wird beim Stahlwerksprodukt ganz allgemein die chemische Analyse des Stahles angesehen, weil diese Werte während des Schmelzprozesses bequem, schnell und mit ausreichender Genauigkeit feststellbar sind und weil von diesen weitgehend, wenn auch nicht ausschließlich, die Stahleigenschaften abhängig sind.

Mit den hier gemachten Voraussetzungen wird eine Annäherung an praktisch vorkommende Produktionsplanungsprobleme erreicht. Bei der mathematischen Formulierung der Modelle sind natürlich Abstraktionen unvermeidlich, damit möglichst alle vorkommenden Probleme in ihrer typischen Fragestellung erfaßt und behandelt werden können. Es soll durch solche Abstraktionen aber auch

die Ausweitungsmöglichkeit auf andere Bereiche industrieller Planung nicht ausgeschlossen werden.

Die hier zur Diskussion stehende Frage ist zunächst die, wie auf Grund einer bestehenden Auftragslage mit den vorhandenen Aggregaten eine optimale Produktion erreicht werden kann. Allgemein liegt dabei das Problem vor, eine Zielfunktion zu optimieren, d.h. zu maximieren oder zu minimieren:

Maximiere (oder minimiere)

$$C_j = \sum_{j=1}^{m} f_j(x_j)$$

unter den Nebenbedingungen

$$g_i(r_{ij} x_j) \gtreqless d_{ij}$$

mit $x_j \geq 0$.

Dabei bedeuten:

r_{ij} = technischer Beiwert des j-ten Produktes für die Nutzung des Faktors D_i.

d_{ij} = begrenzt verfügbare Teilkapazität des Faktors D_i ($i = 1, 2, \ldots, n$; $j = 1, 2, \ldots, m$).

Vor Bildung der Modelle sollen nun zunächst einige Symbole eingeführt und erklärt werden. Dabei wird auf die Symbolik der in dieser Arbeit vorangegangenen Teile zurückgegriffen.

x_j^k = Anzahl Chargen der Produkte j ($j = 1, 2, \ldots, m$), die im Schmelzaggregat k ($k = 1, 2, \ldots, l$) produziert werden. Für diese Größe gilt bei Chargenproduktion, daß $x_j^k \geq 0$ und ganzzahlig sein muß, da nur volle Chargen ausgebracht werden sollen.

M_j = die im Planungszeitraum T mindestens erforderliche Menge an Produkt j.

M_j' = gesamter Auftragsbestand für das Produkt j. Unter den oben genannten Voraussetzungen gilt demnach $M_j' \geq M_j$.

a_{ij}^k = Anteil des Einsatzfaktors i am Gesamteinsatz für das Produkt j im Aggregat k, mit

Dabei gilt weiter

$$0 \leq a_{ij}^{k} \leq 1 \; ; \quad \sum_{i=1}^{v} a_{ij}^{k} = 1 \; .$$

A_i = gesamt verfügbare Menge des Faktors i im Zeitraum T.

a_i = Menge des Faktors i, der nicht zum Chargengewicht beiträgt, i = v+1, ..., v+w, wobei v+w = n.

s^k = die Ofenkapazität, d.h. die maximal mögliche Ausbringungsmenge pro Charge im Aggregat k, das zulässige maximale Chargengewicht.

t_{hj}^k = Zeitbedarf einer Charge des Produktes j im Aggregat k beim Prozeßpunkt h.

T^k = gesamt verfügbare Schmelzzeit im Aggregat k, d.h. die zeitliche Kapazität, berechnet aus Kalenderzeit der Periode T abzüglich geplanter Reparaturzeiten, $T^k = T^K - T^R$.

c_j^k = Kosten einer Charge des Produktes j im Aggregat k im DM/Charge.

c_i = Kosten einer Einheit des Faktors i in DM/t oder DM/kg oder ähnliches.

c_t^k = Kosten einer Zeiteinheit im Aggregat k (DM/h).

P_h = der Prozeßpunkt, welcher die Einsatzzusammensetzung angibt.

Die Chargendauer t_j^k setzt sich aus mehreren Teilzeiten zusammen und erfaßt die Gesamtzeit von Abstich zu Abstich. Diese Zeit ist von mehreren Faktoren abhängig. Einmal, wie schon durch die Indizierung angezeigt, vom Produkt j. So braucht ein niedriggekohlter Stahl mit geringem Kohlenstoffgehalt in der Endanalyse ebenso wie ein stark entschwefelter Stahl eine längere Zeit als eine Stahlschmelze, welche nicht so weitgehend entkohlt oder entschwefelt werden muß. Dies sind metallurgische Notwendigkeiten bei der Planung des zeitlichen Ablaufs der Fertigung [1]. Gleichzeitig hat das jeweilige Schmelzaggregat einen Einfluß, einmal durch seine Größe, aber auch durch seinen technischen Zustand,

1) Vgl. Ellinger, T., a.a.O., S. 19 ff.

bedingt durch das Ofenalter. So arbeitet ein neu zugestellter Ofen genauer und ist leichter und sicherer zu behandeln als einer, der schon einige hundert Schmelzen gemacht hat. Von großem Einfluß auf die Chargendauer ist vor allem die Einsatzzusammensetzung.

Bei dem groben Stahlwerksbetrieb entziehen sich eine Reihe von Einflußgrößen der Beobachtung, ein Teil davon ist auch nicht eindeutig quantifizierbar, selbst wenn er erkannt werden kann. Für die Bildung der Modelle sollen deshalb nur diejenigen Faktoren herangezogen werden, die einen besonders starken und relativ leicht erfaßbaren Einfluß ausüben. Dies sind vor allem drei Faktoren:

a. das Produkt j
b. das Aggregat k
c. die Einsatzzusammensetzung.

Es ist selbstverständlich nicht notwendig, daß bei praktischer Durchführung von Produktionsprogrammplanungen die Planung auf die eben angeführten Daten beschränkt bleibt. Es ist jederzeit möglich, durch Einführung weiterer Nebenbedingungen das System zu verfeinern und auszuweiten. Zur Demonstration und Ableitung der grundsätzlichen Bedingungen ist aber die erwähnte Einschränkung notwendig.

Bei den Produktionsprogrammplanungsmodellen sollen deterministische und stochastische Modelle unterschieden werden. Deterministisch ist ein Modell, wenn jeder Entscheidung eine bestimmte Auswirkung zugeschrieben werden kann. Liegen zu allen oder einigen Entscheidungen für deren Auswirkung Wahrscheinlichkeitsverteilungen vor, so spricht man von stochastischen Modellen [1].

1) Vgl. Haertel, R., a.a.O., S. 255. - Förstner, K., a.a.O., S. 40. – Peters, B., a.a.O., S. 67.

1. Deterministische Modelle

In der Planungsperiode T sollen j Produktarten (Stahlqualitäten) in k Aggregaten (Stahlwerksöfen) mit i Einsatzfaktoren (Schrott, Roheisen, Arbeit, Energie usw.) erstellt werden. Dabei wird jeweils eine volle Charge zu einem Zeitpunkt bzw. in einem bestimmten Zeitintervall in die Produktion eingeführt und als Ganzes aus der Apparatur, hier dem Schmelzaggregat, entnommen [1]. Das ist der typische Fall einer diskontinuierlichen Produktion. Es sind nun die Chargenanzahlen jedes Produktes so zu bestimmen, daß die geplanten Bedarfsmengen auf Grund der Auftragsbestände mit den vorhandenen oder während der Planungsperiode beschaffbaren Einsatzfaktoren gedeckt werden können, wobei die Gesamtkosten ein Minimum erreichen sollen.

Im Zeitpunkt T_o, am Beginn der Planungsperiode, sollen alle Aggregate leer stehen bzw. neu in Betrieb genommen werden. Dieser Fall ist praktisch auch durchaus denkbar, wenn beispielsweise ein Stahlwerksbetrieb während des Wochenendes nicht produziert oder wenn für alle Aggregate in bestimmten Abständen Reparaturschichten eingelegt werden und danach für alle gemeinsam die Produktion wieder aufgenommen wird. Dann ist es sinnvoll, die Planungsperiode mit dem Wochenrhythmus oder dem Reparaturrhythmus abzustimmen. Läßt sich ein solcher regelmäßiger Zeitabschnitt der Planung nicht zugrunde legen, wie es etwa bei monatlicher Planung der Fall ist, so sind zu Beginn der Periode in den Schmelzöfen Chargen in Bearbeitung, die noch zur Planung der vorangegangenen Periode gehören. In diesem Fall verkürzt sich die verfügbare Schmelzzeit im Aggregat k um die

1) Vgl. Riebel, P., a.a.O., S. 138.

um die Zeit, in der eine solche Charge sich noch im Ofen befindet. Für ein solches Aggregat beginnt dann die Planungsperiode nicht im Zeitpunkt T_o sondern entsprechend später. In dieser soll davon ausgegangen werden, daß die Planungsperiode, wie auch immer festgesetzt, bekannt ist und der Planung als Datum vorgegeben ist.

Die Produktionskosten sind für jede Charge gegeben durch eine Funktion $C_j = f_j(\underset{\sim}{x}_j)$. Die gesamten Kosten setzen sich dabei zusammen aus einem rein mengenabhängigen und einem zeitabhängigen Teil, wobei die Produktionsdauer wiederum eine Funktion der Einsatzzusammensetzung ist. Die Einsatzfaktoren können weiter unterteilt werden in solche, die auf das Chargengewicht einen Einfluß haben ($i = 1, 2, \ldots, v$) und solche, die keinen solchen Einfluß ausüben ($i = v+1, \ldots, v+w$). Dabei ergeben sich ganz allgemein die Gesamtproduktionskosten zu

$$C = f(x) = f_1(a_i s^k c_i x_j^k) + f_2(t_{hj}^k(\underset{\sim}{p}_h) c_t^k x_j^k) \qquad (A\ 1.1)$$

Diese Funktion soll zu minimieren sein unter den allgemeinen Nebenbedingungen

$$\sum_{j=1}^{m} r_{ij}^k x_j^k \begin{matrix} \geq \\ = \\ \leq \end{matrix} d_i \qquad (A\ 1.2)$$

$$x_j^k \geq 0 \qquad (A\ 1.3)$$

$(i = 1, 2, \ldots, v, v+1, \ldots, v+w\ ;$
$j = 1, 2, \ldots, m\ ;\ k = 1, 2, \ldots, l\ ;$
$h = 1, 2, \ldots, p\ )\ ,$

wobei

r_{ij}^k = technischer Beiwert des j-ten Produktes für die Nutzung des Faktors D_i im Aggregat k

d_i = begrenzt verfügbare Teikapazität des Faktors D_i

bedeuten [1].

Um den Sachverhalt zu spezialisieren sollen die Möglichkeiten für die Chargendauer als Funktionen der Einsatzzusammensetzung $t^k_{hj}(P_h)$ kurz definiert werden.

a) $t^k_{hj}(P_h) = t^k_{hj} a_i s^k$, d.h. die Chargendauer ist eine lineare Funktion der eingesetzten Faktormengen,

$$t^k_{hj} = \sum_{i=1}^{v} t^k_{ij} a_i s^k \qquad (A\ 1.4)$$

bei v Einsatzfaktoren.

Graphisch dargestellt ergibt sich bei zwei Einsatzfaktoren die Fig. 13, bei drei Faktoren Fig. 14.

$$t^k_{hj} = \sum_{i=1}^{2} t^k_{ij} a_i s^k = t^k_{1j} a_1 s^k + t^k_{2j} a_2 s^k \qquad (A\ 1.5)$$

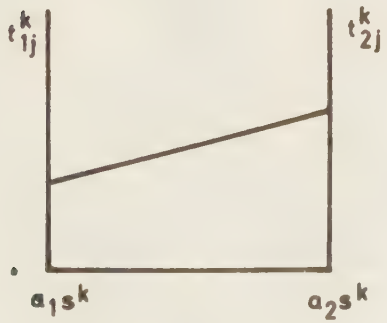

Fig.13

1) Formal ergibt sich hier eine Annäherung an das Losgrößenproblem, wie es bei Peters, B., a.a.O., S. 68 ff. beschrieben wurde und welches auf das Lagerhaltungsproblem bei Modigliani und Hohn zurückzuführen ist. - Vgl. Modigliani, F. und Hohn, F.E., "Production Planning Over Time and the Nature of the Expectation and Planning Horizon", Econometrica, Vol. 23, 1955, S. 46 ff. - Manne, A.S., "A Note on the Modigliani-Hohn Production Smoothing Model", Management Science, Vol. 3, 1957, S. 371 ff. - Daß es sich hierbei tatsächlich nur um eine formale Angleichung handelt ergibt sich bereits aus dem unterschiedlichen Zweck der Modelle. Hier ist die Losgröße eine von vorn herein festliegende Größe, gegeben durch das jeweilige Chargengewicht.

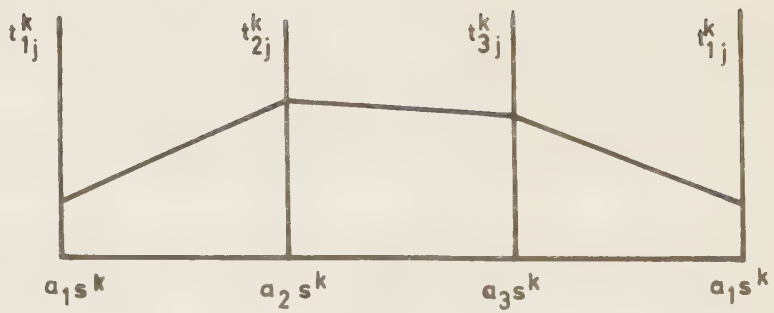

Fig.14 a

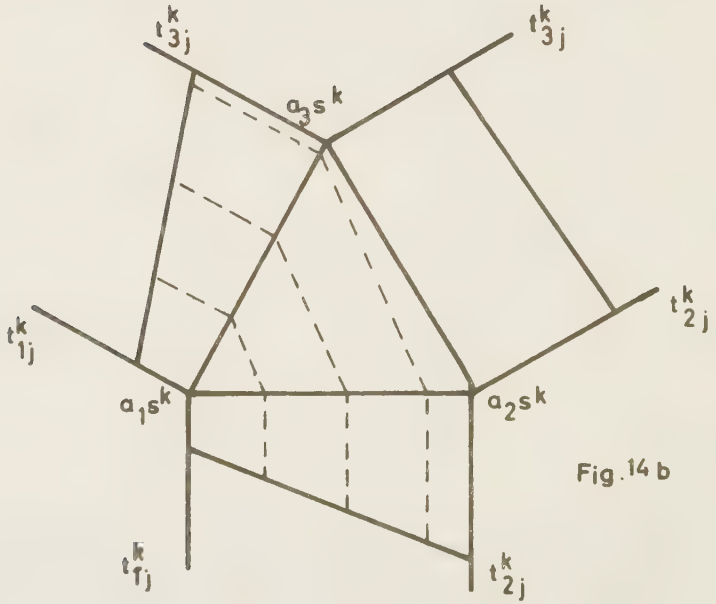

Fig.14 b

Die gestrichelten Linien in Fig. 14 b bedeuten dabei Linien gleichen Zeitbedarfs bei Kombination zweier bzw. dreier Einsatzfaktoren.

b) $t^k_{hj}(P_h) = g_i(a_i)t^k_{ij}s^k$. Die Chargendauer ist eine irgendwie gekrümmte konvexe oder konkave Funktion [1] der Einsatzzusammensetzung. Graphisch ergibt sich dabei die Fig. 15 bzw. Fig. 16 bei drei Einsatzfaktoren.

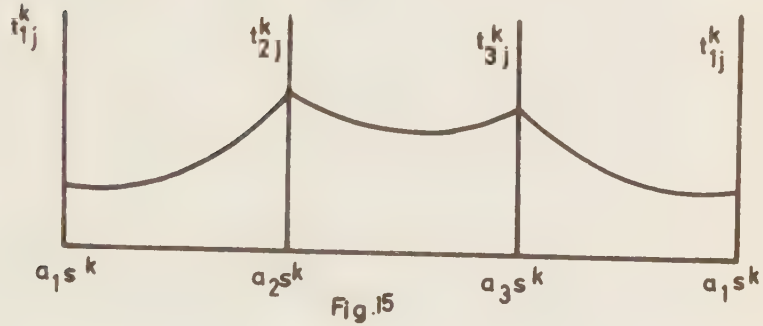

Fig.15

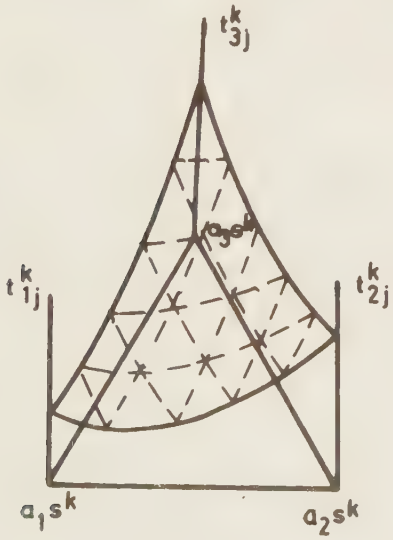

Fig.16

[1] In Stahlwerksbetrieben ist diese Funktion regelmäßig konvex gekrümmt. Vazsonyi spricht in diesem Sinne von Funktionen, die "konvex von oben" oder "konvex von unten" sein können. - Vgl. Vazsonyi, A., Scientific Programming in Business and Industry, New York 1958, S. 199.

Das Zustandekommen solcher konvexer Funktionen läßt sich wie folgt erklären: es sollen drei charakteristische Einsatzarten betrachtet werden, nämlich schwerer Schrott, leichter Schrott und flüssiges Roheisen, sowie deren Einfluß auf die Chargendauer. Schwerer Schrott sind z.B. Blockenden, Ausschußblöcke, schwere Trägerenden und ähnliches. Leichter Schrott sind Stanzabfälle, Blechstreifen usw., die ein relativ geringes spezifisches Raumgewicht haben. Als Maßstab hierfür kann das Gewicht pro eingesetzter"Mulde" betrachtet werden, z.B. Schwerschrott über 1 t pro Mulde, Leichtschrott unter 0,5 t/Mulde. Die Übergänge sind fließend. Der mittelschwere Schrott soll deshalb aus dieser Betrachtung der Übersichtlichkeit wergen herausgelasen werden.

Der Einfluß auf die Chargendauer läßt sich nun wie folgt beschreiben: wird schwerer Schrott eingesetzt, so kann pro Zeiteinheit eine große Menge in den Ofen eingebracht werden. Dadurch wird die Chargierdauer abgekürzt. Auf der anderen Seite schmelzen aber kompakte Massen langsamer auf, da für den Wärmeübergang von der Flamme bzw. dem bereits aufgeschmolzenen Bad eine geringe Außenfläche zur Verfügung steht. Umgekehrt verhält es sich mit Leichtschrott, der langsamer chargiert werden muß, da er im Ofen viel Platz beansprucht und erst wieder nachgesetzt werden kann, wenn ein erheblicher Teil des Einsatzes eingeschmolzen ist. Wegen der größeren Angriffsfläche für den Wärmeübergang ist bei lockerer Schüttung diese Einschmelzdauer geringer als bei Schwerschrott. Allgemein läßt sich sagen, daß die Einsatzart zwei verschiedene, sich widersprechende Einflüsse auf die gesamte Chargendauer ausübt. Ist der gesamte Schrotteinsatz verflüssigt,

dann sind, bei gleicher chemischer Zusammensetzung, die Einsatzarten natürlich identisch in ihrem 'erhalten.

Diesen bisher geschilderten Bedingungen ist der Einfluß mehr oder weniger großer Zusätze von flüssigem Roheisen überlagert. Auch hier finden sich zwei gegensätzlich wirkende Tendenzen. Ist der Roheiseneinsatz hoch, dann wird dadurch eine erhebliche Zeitersparnis erreicht, da ein großer Anteil der zeitfordernden Einschmelzarbeit fortfällt, weil entsprechend weniger fester Schrott aufgeschmolzen werden muß. Andererseits bedingt das flüssige Roheisen relativ hohe Kohlenstoff-, Schwefel- und Phosphorgehalte in den Schmelzen, deren Entfernung notwendig wird und Zeit beansprucht. Die Einschmelzdauer wird durch hohe Roheisensätze abgekürzt auf Kosten einer Verlängerung der Kochperiode im Ofen.

Eine Abkürzung der Kochperiode im Siemens-Martin-Ofen oder der Blasezeit im Thomaskonverter kann durch Zuführung von reinem Sauerstoff in die Schmelze oder Anreicherung der Balseluft mit Sauerstoff erzielt werden. Dadurch ist es möglich, auf wirtschaftliche Weise höhere Roheisenanteile zu verarbeiten. Eine solche Arbeitsweise stellt bereits ein anderes Schmelzverfahren dar. Allerdings läßt sich dies modellmäßig auch erfassen durch Aufteilung der Prozeßpunkte in solche, bei denen ohne, und in solche, bei denen mit Sauerstoff gearbeitet wird. Dann müssen im Modell aber zusätzliche Restriktionen eingeführt werden, die den Sauerstoffverbrauch berücksichtigen. Die dem Prozeßpunkt P_h zugeordneten Zeitfaktoren reduzieren sich bei Sauerstoffblasen entsprechend.

Der Zeitpunkt der Roheisenzugabe spielt noch in einem anderen Zusammenhang eine Rolle. Wird zu einem zu frühen Zeitpunkt, wenn noch größere Mengen unaufgeschmolzenen Schrottes im Ofen sind, Roheisen flüssig zugegeben, so verzögert dies das Aufschmelzen, da die indirekte Wärmeübertragung von der Heizflamme über die flüssige Schmelze zum unaufgeschmolzenen Bodensatz langsamer erfolgt als bei direktem Angriff der Flamme auf den festen Schrott oder bei Übertragung durch eine geringerflüssige Schicht. Andererseits verzögert auch eine zuspäte Roheisenzugabe die Chargendauer, da das verspätete Einbringen von Kohlenstoff und anderen zu entfernenden Elementen die Gesamtzeit verlängert. Es ist also unter diesen Gesichtspunkten für jeden Betrieb und für jedes unterschiedlich dimensionierte Schmelzaggregat eine günstigste Einsatzzusammensetzung und ein optimaler Roheisensatz festzustellen. Dieses sind aber vornehmlich technisch-statistische Probleme, die hier nicht im Einzelnen zu untersuchen sind. Für die Produktionsplanung sind dadurch weitere, unabänderliche Daten gegeben.

Durch solche speziellen Untersuchungen sind für jedes Produkt j und jedes Schmelzaggregat k Kurven festzustellen, die im Prinzip durch die Fig. 15 und Fig. 16 wiedergegeben sind. Bei festgelegter Einsatzzusammensetzung kann dann die Chargendauer in Abhängigkeit von dieser abgelesen werden.

Werden durch die Hyperbene zwischen den t_{ij}^{k}-Werten der Fig. 16 Horizontalschnitte gelegt, so erhält man in der Projektion auf die Grundfläche eine Schar mehr oder weniger deformierter Kreise, die jeweils Kurven gleichen Zeitbedarfs darstellen. Dies entspricht den

den Isotimen (Kurven gleichen Wertes) bei Stackelberg [1]. Diese Verhältnisse sind in Fig. 17 zu erkennen.

Fig.17

Im Punkte $M_{abs.}$ befindet sich dann das absolute Zeitbedarfsminimum. Die Chargendauer bei Einsatzfaktorkombinationen kann dann auf den Isotimen abgelesen werden. Daß in solchem Schaubild jeweils nur die Verhältnisse für ein bestimmtes Produkt j in einem bestimmten Aggregat k dargestellt werden können wird durch die Indizes hervorgehoben. Bei mehr als drei Einsatzfaktoren ist eine solche graphische Interpretation nicht mehr möglich. Dann muß die Chargendauer bei Einsatzfaktorkombination tabellarisch, nomographisch oder statistische festgestellt werden.

Werden die Zeitfaktoren jeweils mit dem Kostenfaktor c_t^k bewertet, so kann in einem ähnlichen Schaubild direkt der Zusammenhang zwischen Einsatzzusammensetzung und dem zeitabhängigen Kostenanteil dargestellt werden. In solchem Fall werden aus den Isotimen Isokostenlinien. Dabei muß aber betont werden, daß es sich nur um einen Teil der Gesamtkosten handelt.

---

1) Stackelberg, H.v., Grundlagen der theoretischen Volkswirtschaftslehre, 2. Auflage, Tübingen-Zürich 1951, S. 119 ff.

c) $t^k_{hj}(P_h) = t^k_j + t^k_{hj} a_i s^k$. Hierbei soll die Einsatzfaktorzusammensetzung nicht die gesamte Chargendauer beeinflussen, daneben tritt ein von der Einsatzzusammensetzung unabhängiger Zeitanteil auf. Dieser Fall ist gegeben, wenn nur während der Einschmelzdauer der Einfluß des Einsatzes wirksam ist, während der Kochperiode andere Faktoren aber die ausschließliche ider überwiegende Rolle spielen.

Die Kostenfaktoren innerhalb der Kostenfunktion $C = f(x_j)$ können sowohl für die Einsatzfaktorkosten c_i mit $i = 1, 2, \ldots, v, v+1, \ldots, v+w$, als auch für die Zeitkosten c^k_t unabhängige Kosten pro Einheit darstellen, d.h. die Preise bzw. Kosten der Faktoren sind von ihrem Mengeneinsatz nicht abhängig, oder es können abhängige Kosten sein. Nach diesem Auswahlkriterium sollen die folgenden Modelle gebildet werden.

a. Modelle mit unabhängigen Kostenfaktoren

Modell (1a1)

Ausgangsbedingungen:

aa. Es soll nur ein einziges Schmelzaggregat vorhanden sein. Gleichzusetzen ist der Fall, daß nur Aggregate gleicher Größe und Leistung gegeben sind.

bb. Von den Einsatzfaktoren sollen v auf das Chargengewicht Einfluß haben (Schrott, Roheisen), während die übrigen ($i = v+1, \ldots, v+w$) zwar zur Produktion notwendig sind, aber das Chargengewicht nicht beeinflussen (Brennstoffe, Energie usw.). Diese nicht gewichtswirksamen Faktoren sollen auch die Chargendauer nicht beeinflussen, mit anderen Worten, die Chargendauer ist lediglich eine Funk-

tion der gewichtswirksamen Einsatzfaktoren i ($i = 1, 2, \ldots, v$),

$$t^{k}_{hj} = f(a_{i = 1, 2, \ldots, v}).$$

cc. Der Zeitbedarf kann als lineare Funktion der eingesetzten Mengen angesehen werden.

Es ist hier der Fall gegeben, wo in einem einzigen oder mehreren gleichartigen Thomaskonvertern oder Siemens-Martin-Öfen immer ein gleichartiges Vorprodukt, nämlich Roheisen gleicher Zusammensetzung eingesetzt wird. Ein solcher Einheitseinsatz kann durch Vorschalten eines Roheisenmischers erreicht werden. Dabei werden Unterschiede der Roheisenanalyse im Mischer ausgeglichen. Außerdem kann dieser Ausgleich durch metallurgisches Arbeiten beschleunigt und gesteuert werden. In diesem Fall ist $i = 1$. Eine solche Einschränkung ist für dieses Modell nicht notwendig, es können dabei beliebig viele Einsatzfaktoren verwandt werden, also $i = 1, 2, \ldots, v$.

Es darf nicht übersehen werden, daß für ein gefordertes Chargengewicht entsprechend mehr Vormetall eingesetzt werden muß, um den Abbrand und sonstige Verluste auszugleichen. Dieser Abbrand ist vom jeweiligen Produkt j abhängig. Diesen Verhältnissen kann durch Einführung einer Konstanten Rechnung getragen werden, die als Faktor mit der Einsatzmenge multipliziert wird. Ist auf Grund technischer Untersuchungen bekannt, daß das flüssige Ausbringen für das Produkt j im Verhältnis zum eingesetzten metallischen Werkstoff q_j % beträgt (z.B. bei 85 % Ausbringen ist $q_j = 85$ % bzw. 0,85, so muß die Gesamteinsatzmenge

$$P_h = \frac{1}{q_j} \quad \text{mit} \quad P_h = \sum_{i=1}^{v} a_i = 1 \quad \text{und}$$

$$P'_h = \frac{s^k}{q_j}, \qquad \text{wenn } P'_h = \sum_{i=1}^{v} a_i s^k = s^k$$

betragen. Um den wahren Einsatzanteil zu erhalten sind demnach alle Faktormengen a_i mit dem Wert $\frac{1}{q_j}$ zu multiplizieren. In dieser Arbeit soll der Übersichtlichkeit wegen angenommen werden, daß diese Verhältnisse in den a_i-Werten bereits berücksichtigt sind und entsprechend mehr Einsatzwerkstoff eingebracht wird, um eine volle Charge zu erhalten. Durch Einführung der Konstanten q_j kann auf die Abbrand- und Verlustverhältnisse Rücksicht genommen werden.

Es ergibt sich folgendes Problem:
Es ist die Funktion

$$C = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left[\left(\sum_{i=1}^{v} a_i s^k c_i + \sum_{i=v+1}^{v+w} a_i c_i + \right. \right.$$

$$\left. \left. + t_{hj} c_t \right) x_j \right] \qquad \text{(A 1.6)}$$

zu minimieren unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{k=1}^{l} s^k x_j \geq M_j \qquad \text{(A 1.7)}$$

$$\sum_{k=1}^{l} s^k x_j \geq M'_j \qquad \text{(A 1.8)}$$

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} a_i s^k x_j \leq A_i \qquad \text{(A 1.9)}$$

$$\sum_{h=1}^{p} \sum_{j=1}^{m} t_{hj} x_j \leq T^k \qquad \text{(A 1.10)}$$

$$x_j \geq 0, \quad \text{ganzzahlig!} \qquad \text{(A 1.11)}$$

$(j = 1, 2, \ldots, m;\ k = 1, 2, \ldots, l;\ h = 1, 2, \ldots, p;$
$i = 1, 2, \ldots, v, v+1, \ldots, v+w).$

Allgemein lassen sich alle Nebenbedingungen auf die einfachen Formen (A 1.2) und (A 1.3) zurückführen [1], doch kommt es hier bei diesen Modellen darauf an, Hinweise auf praktische Lösungsmöglichkeiten zu geben. Aus diesem Grunde sollen auch die Bedingungen (A 1.7) bis (A 1.11) an dieser Stelle kurz erläutert werden.

(A 1.7) bedeutet, daß in allen Aggregaten k, welche die Kapazität s^k besitzen, insgesamt vom Produkt j mindestens die Menge M_j produziert werden muß. M_j sollen die strikt determinierten Mengen sein, die im Planungszeitraum zu erstellen sind. Eine genaue Entsprechung zu (A 1.7) stellt die Bedingung (A 1.8) dar. Hier bedeutet M'_j die gesamt vorhandene Auftragsmenge für das Produkt j. Diese Menge soll nicht überschritten werden, damit nicht unabsetzbare Lagerbestände auftreten. Es mag sicher Fälle geben, wo für häufig angeforderte Qualitäten solche Obergrenzen nicht erforderlich sind. Doch ist dann zu berücksichtigen, daß produzierte Blöcke möglicherweise nicht abgesetzt werden können, weil die Abmessungen mit späteren Bestellungen nicht übereinstimmen, und daß außerdem zusätzliche Lagerprobleme auftreten. Bei der Bemessung von M'_j sollen diejenigen Aufträge über M_j hinaus berücksichtigt werden, bei denen sicher ist, daß der Besteller die Fertigprodukte auch sofort nach Herstellung abzunehmen bereit ist, auch wenn der Liefertermin dabei unterschritten wird. Ist der mögliche Fall gegeben, daß $M_j = M'_j$, dann können (A 1.7) und (A 1.8) zu der einen Beschränkung

$$\sum_{k=1}^{1!} s^k x_j = M_j$$

zusammengefaßt werden. Für das Modell bieten solche

1) s. S. 84

Sonderfälle keine Schwierigkeiten und sollen daher nicht gesondert berücksichtigt werden.

(A 1.9) nimmt Rücksicht auf die innerhalb der Planungsperiode bereits auf dem Lager vorhandenen oder beschaffbaren, insgesamt also zur Verfügung stehenden Mengen der i Einsatzfaktoren. Diese Faktoren können dabei Einsatzstoffe, Zusatzstoffe, Energiemengen, Brennstoffe, Arbeitskräfte und anderes sein. Es ist hier darauf hinzuweisen, daß a_i mit $i = 1, 2, \ldots, v$ in einem anderen Maßstab angegeben wird als a_i mit $i = v+1, \ldots, v+w$. In einem Fall sind es Gewichtsanteile bezogen auf das Chargengewicht, im anderen Fall absolute Mengenangaben. Dennoch sollen die gesamten Produktivfaktoren, die eingesetzt werden, in dieser Form als a_i zusammengefaßt werden, da dies auch bei der praktischen Rechnung keine Schwierigkeiten verursacht. Nur innerhalb einer bestimmten Beschränkungsgleichung, die einer Zeile der Produktionsmatrix entspricht, sind gleiche Diemensionen gefordert, was bei der vorliegenden Formulierung gewährleistet ist.

(A 1.10) bedeutet, daß die insgesamt verfügbare Schmelzzeit T^k im Aggregat k nicht überschritten werden darf. Die günstigste Situation ist hier ganz offensichtlich, wenn kein Aggregat Leerzeiten aufweist, d.h. wenn

$$\sum_{j=1}^{m} t_{hj} x_j = T^k.$$

Doch wird auf diese Probleme später noch einzugehen sein.

(A 1.11) : $x_j = 0$, ganzzahlig! ist die Nichtnegativitätsbedingung, gekoppelt mit einer Ganzzahligkeits-

forderung. Das erste ist eine wirtschaftlich und technisch selbstverständliche Bedingung, die aber mathematisch notwendig ist. Die Ganzzahligkeitsbedingung für die Chargenanzahlen x_j bedeutet, daß jeweils nur volle Chargen ausgebracht werden sollen. Technisch ist bis zu einem gewissen Grad ein geringerer Ausnutzungsgrad der Aggregate als es der maximalen Kapazität entspricht, möglich, doch soll dies hier unberücksichtigt bleiben.

Modell (1a2)

Oft sind in einem Stahlwerk verschieden große Schmelzöfen installiert. Das kann entwicklungstechnische Gründe haben, wenn kleinere Öfen älterer Bauart neben modernen größeren Öfen stehen. Es kann auf diesem Wege aber auch versucht werden, die Auftragsgröße und Auftragseigenart zu berücksichtigen. Dann werden kleinere Aggregate, die während des Prozesses leichter zu beeinflussen sind, für bestimmte Sonderqualitäten oder für geringe Auftragsmengen einer bestimmten Qualität eingesetzt, während die großen Aggregate weniger empfindliche Massenstähle produzieren. Es kann in diesem Modell auch ein Wechsel von einem Produktionsverfahren zu einem anderen, z.B. vom Thomasverfahren zum Sauerstoffaufblasverfahren oder umgekehrt gestattet werden, doch hat dies für die Praxis bisher nur wenig Bedeutung, da meistens die Aufträge so weit spezifiziert sind, daß ein bestimmtes Verfahren vom Kunden vorgeschrieben wird. Mit der Entwicklung und Verbesserung neuer Stahlherstellungsverfahren durch Sauerstoffaufblasen im Konverter (L-D-Verfahren), die im Konverter einen Stahl bestimmter Qualität mit den gleichen Eigenschaften wie ein im Siemens-Martin-Ofen

erschmolzener, aber mit geringerem Kosten- und Zeitaufwand zu produzieren gestatten, ist eine solche Austauschmöglichkeit für die Zukunft aber praktisch durchaus denkbar. Deshalb soll dieser Fall hier ausdrücklich eingeschlossen werden.

Ausgangsbedingungen:

aa. Es sollen unterschiedlich dimensionierte und unterschiedlich leistungsstarke Aggregate zugelassen sein. Dabei ist auch ein Austausch der Verfahren zulässig.

bb. Von den Einsatzfaktoren i sollen v auf das Chargengewicht Einfluß haben (i = 1, 2, ..., v), während die übrigen (i = v+1, ..., v+w) zwar für die Produktion notwendig sind, aber das Chargengewicht nicht beeinflussen. Diese Faktoren sollen auch auf die Chargendauer keine Wirkung ausüben.

cc. Der Zeitbedarf kann, wie bei Modell (1a1) als lineare Funktion der eingesetzten Faktormengen i = 1, 2, ..., v dargestellt werden.

Mathematisch stellt dieser Fall nur eine Variante des Modells (1a1) dar und ist ganz ähnlich zu behandeln. Die Gesamtkostenfunktion

$$C = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left[\left(\sum_{i=1}^{v} a_i s^k c_i + \sum_{i=v+1}^{v+w} a_i^k c_i + t_{hj}^k c_t^k \right) x_j^k \right] \qquad \text{(A 1.12)}$$

ist unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{k=1}^{l} s^k x_j^k \geq M_j \qquad \text{(A 1.13)}$$

$$\sum_{k=1}^{l} s^k x_j^k \geq M_j' \qquad \text{(A 1.14)}$$

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} a_i s^k x_j^k \leq A_i \qquad \text{(A 1.15)}$$

$$\sum_{h=1}^{p} \sum_{i=1}^{v} t_{hj}^k x_j^k \leq T^k \qquad \text{(A 1.16)}$$

$$x_j^k \geq 0 \text{ , ganzzahlig!} \qquad \text{(A 1.17)}$$

$(j = 1, 2, \ldots, m;\ k = 1, 2, \ldots, l;\ h = 1, 2, \ldots, p;$
$i = 1, 2, \ldots, v, v+1, \ldots, v+w)$

zu minimieren. Die Bedeutung der k-Indizes ist gegenüber dem Modell (1a1) hier aber erweitert.

Modell (1a3)

Ausgangsbedingungen:

aa. Wieder sollen nach Größe und Leistung unterschiedlich dimensionierte Schmelzaggregate zugelassen sein.

bb. Die Chargendauer setzt sich zusammen aus einem Faktor, der durch die gewichtswirksamen Einsatzfaktoren i (i = 1, 2, ..., v) bestimmt wird (proportionaler Anteil), und einem von anderen Einflußgrößen abhängigen Bestandteil (konstanter Anteil).

cc. Die Chargendauer soll weiterhin als lineare Funktion der Einsatzzusammensetzung darstellbar sein.

Bei diesem Modell wird die Bedingung fallen gelassen, daß die nicht gewichtswirksamen Einsatzfaktoren die Chargendauer nicht beeinflussen sollen. Solche nicht einsatzbedingten Zeitfaktoren t_j^k, die regelmäßig für ein bestimmtes Produkt j in jeweils gleicher Höhe anfallen können, sind Rüstzeiten irgendwelcher Art, z.B. Flickzeiten für den Herd eines Ofens. Diese Zeiten können aber auch durch spezielle produktbedingte technologische Operationen bedingt sein, wie etwa Desoxydationsvorgänge im Ofen, die eine bestimmte zusätzliche

Zeit beanspruchen, oder ähnliches. Ganz allgemein kann festgestellt werden, daß nur Teile der Gesamtchargendauer durch den Einsatz bestimmt werden, z.B. nur die Zeit, bis der gesamte feste Einsatz aufgeschmolzen ist ("Losschmelzzeit"), der weitere Verlauf der Charge aber ausschließlich oder überwiegend von anderen Faktoren determiniert wird, so daß nicht mehr die gesamte Chargendauer als Funktion der Einsatzzusammensetzung darstellbar ist. In diesem Modell soll vorausgesetzt werden, daß lineare Zeitverhältnisse vorliegen, daß sich also die Chargendauer aus einem konstanten und einem proportionalen Anteil zusammensetzt. Unter diesen Voraussetzungen wird die Zielfunktion $C = f(x_j)$ in entsprechender Weise modifiziert, indem eine zeitbezogene Zusatzkomponente eingeführt wird. Das Problem ist dann wie folgt zu formulieren:
Zu minimieren ist eine Funktion

$$C = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left[\left(\sum_{i=1}^{v} a_i s^k c_i + \sum_{i=v+1}^{v+w} a_i s^k + t_{hj}^k c_t^k + t_j^k c_t^k \right) x_j^k \right] \qquad \text{(A 1.18)}$$

unter den Nebenbedingungen (A 1.13) bis (A 1.15),

$$\sum_{h=1}^{p} \sum_{j=1}^{m} t_{hj}^k x_j^k + \sum_{j=1}^{m} t_j^k x_j^k \leq T^k \qquad \text{(A 1.16a)}$$

und (A 1.17).

($j = 1, 2, \ldots, m$; $k = 1, 2, \ldots, l$; $h = 1, 2, \ldots, p$; $i = 1, 2, \ldots, v, v+1, \ldots, v+w$)

Modell (1a4)

Gegenüber dem vorangegangenen Modellen soll hier die Annahme, daß die Chargendauer als lineare Funktion der Einsatzzusammensetzung dargestellt werden kann, fallen

gelassen werden. Die Chargendauer ist eine konvex gekrümmte Funktion der Einsatzfaktormengen, wobei nicht nur gewichtswirksame Faktoren dabei mitwirken, sondern auch solche das Chargengewicht nicht beeinflussendeFaktoren in irgendeiner, hier nicht näher zu erklärenden Weise die Chargendauer bestimmen. Das Zustandekommen solcher gekrümmter Zeitfunktionen wurde bereits beschrieben. Weiter sollen die übrigen Bedingungen des Modells (1a3) Geltung haben, also das Vorhandensein gewichtswirksamer und nicht gewichtswirksamer Einsatzfaktoren, unterschiedlich große und leistungsstarke Aggregate, sowie konstante und proportionale Zeitanteile.

In der mathematischen Formulierung ergibt sich kein Unterschied, ob von linearen oder konvexen Zeitfaktoren ausgegangen wird. Man minimiere

$$C = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left[\left(\sum_{i=1}^{v} a_i s^k c_i + \sum_{i=v+1}^{v+w} a_i^k c_i + t_{hj}^k c^k t + t_j^k c_t^k \right) x_j^k \right] \qquad \text{(A 1.18)}$$

unter den Nebenbedingungen (A 1.13) bis (A 1.15), (A 1.16a) und (A 1.17).

b. Modelle mit abhängigen Kostenfaktoren

Bei den bis jetzt beschriebenen Modellen wurde vorausgesetzt, daß die eingesetzten Faktoren mit konstanten Kostensätzen bewertet werden. Das bezieht sich sowohl auf die Material- und Energiekosten als auch auf die Zeitfaktoren. Diese Unterstellung ist aber nicht in allen Fällen gerechtfertigt, weil oftmals die Kostensätze von den eingesetzten Faktormengen

abhängen. Es ist nochmals darauf hinzuweisen, daß wir es hier ausschließlich mit statischen Modellen zu tun haben, d.h. die Daten, welche der Planung zugrunde liegen, sollen für die gesamte Planungsperiode als unveränderlich angenommen werden. Es ergeben sich keine Änderungen im Zeitablauf, sondern nur Mengenänderungen, deren Kostenseinfluß keinen zeitlichen Schwankungen unterworfen sein sollen.

Beim Einsatz größerer Mengen bestimmter Faktoren können Rabatte oder Preisnachlässe in Form von Preisdifferenzierungen auftreten, die den Ansatz konstanter Kostensätze nicht mehr rechtfertigen. Innerbetrieblich können auch die Zeitfaktoren unterschiedlichen Bewertungen unterliegen, wenn beispielsweise zur Erreichung eines schnellen Durchsatzes mit kurzer Chargendauer eine steigende Bewertung des Stundenkostensatzes in Ansatz zu bringen ist, um auf diese Weise einen Anreiz zur Einhaltung der Planwerte zu schaffen [1]. Die gleiche Möglichkeit der Bewertung ergibt sich auch bei den Materialeinsatzmengen und vor allem der Energiemengen, um die im Bereitstellungsplan eingesetzten Daten im praktischen Betrieb einzuhalten.

Die Kostenfaktoren können mit zunehmendem Faktoreinsatz zunehmen oder abnehmen, und zwar sowohl kontinuierlich als auch diskontinuierlich. Für den Faktor i soll das kurz skizziert werden.

Mit zunehmendem Einsatz des Faktors i sollen auf Grund von Preisnachlässen die Preise, damit die Kosten des Einsatzes, kontinuierlich abnehmen oder zunehmen. Das kann linear oder nichtlinear geschehen (Fig. 18 und Fig. 19).

---

1) Solche Anreizmomente können vor allem bei einem pretial gelenkten Betrieb mit gleichzeitiger Gewinnbeteiligung ein wesentliches Organisationselement darstellen. Auf solche spezielle Organisationsprobleme kann im Rahmen dieser Arbeit aber nicht eingegangen werden . - Vgl. Gutenberg, E., Grundlagen ..., a.a.O., S. 180 ff.

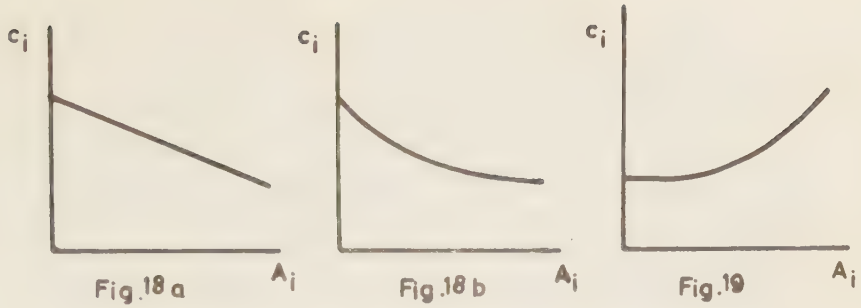

Fig.18 a Fig.18 b Fig.19

Ein solches Variieren der Kostensätze kann aber auch diskontinuierlich erfolgen, und zwar in regelmäßiger oder unregelmäßiger Stufenhöhe und Stufenbreite (Fig. 20 a-c).

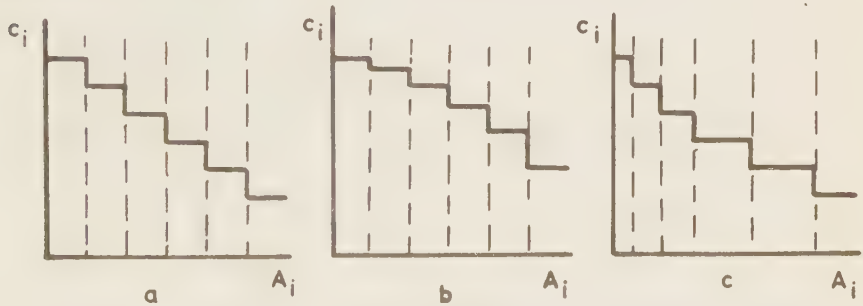

Fig.20

Solche Preis- und Kostenvariationen, deren Zustandekommen hier nicht erklärt werden muß [1], stellen für die Planung Daten dar und sind als solche zu berücksichtigen. Dies soll in den folgenden Modellen geschehen.

1) Vgl. Gutenberg, E., Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, II. Band, Der Absatz, 3. Auflage, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1959, S. 280 ff. - Mellerowicz, K., Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, II. Band, 10. Auflage, Berlin 1959, S. 126 ff. - Schneider, E., Einführung ..., a.a.O., S. 142 ff.

Modell (1b1)

Da es nicht erforderlich ist, sämtliche bisher behandelten Modelle unter den veränderten Voraussetzungen abhängiger Kostenfaktoren umzuformulieren, sollen hier als Ausgangspunkt die Bedingungen des Modelle (1a4) unterstellt werden, d.h. unterschiedlich dimensionierte und unterschiedlich leistungsstarke Aggregate, gewichtswirksame und nicht gewichtswirksame Einsatzfaktoren und konvexer Verlauf der Zeitfunktion mit der Einsatzvariation. Verändert wird nur die Kostenabhängigkeit von der Faktoreinsatzmenge. In diesem Modell soll diese Abhängigkeit entsprechend Fig. 18 als kontinuierlich angenommen werden, wobei offen gelassen wird, ob die Funktion linear oder nichtlinear, fallend oder steigend ist. Diese Fälle lassen sich im Modell alle gleich behandeln.

Die bisher formulierte Kostenfunktion

$$C = f(x_j)$$

wird im Folgenden verändert zu

$$C = (A_i, x_j), \qquad \text{(A 1.19)}$$

da die Kosten der Produktion nicht mehr allein von den ausgebrachten Chargen der Produkte abhängig sind, sondern auch eine Funktion der eingesetzten Faktormengen des Faktors i bilden. A_i ist, bei gewichtswirksamen Faktoren, bestimmt durch

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} a_i s^k x_j^k = A_i \qquad \text{(A 1.20)}$$

und bei nicht gewichtswirksamen Faktoren durch

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} a_i^k x_j^k = A_i' \,. \qquad \text{(A 1.21)}$$

Mit diesen Bedingungen, welche die Höhe des Gesamteinsatzes des Faktors i festlegen, wird die Kostenfunktion $C = f(A_i)$ bestimmt. Der Kostensatz des betrachteten Faktors i - es können auch mehrere solcher Faktoren gleichzeitig auftreten - verändert sich mit der eingesetzten Menge.

$$\frac{\partial c_i}{\partial A_i} d A_i \qquad (A\ 1.22)$$

[1)]

ist dabei die Änderung des Kostensatzes c_i mit der Änderung der Gesamteinsatzmenge, wobei das Symbol ∂ andeuten soll, daß es sich um partielle Betrachtungsweise handelt, wobei die anderen Faktoren in ihrem Einsatz als konstant angesehen werden. Wird nun in (A 1.22) der Wert von A_i durch die Form (A 1.20) bzw. (A 1.21) eingesetzt, erhält man

$$d C_{(i)} = \frac{\partial c_i}{\partial \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} a_i s^k x_j^k} d\left(\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} a_i s^k x_j^k\right) \qquad (A\ 1.23)$$

bzw.

$$d C_{(i)} = \frac{\partial c_i}{\partial \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} a_i^k x_j^k} d\left(\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} a_i^k x_j^k\right) . \qquad (A\ 1.24)$$

Mit dieser Formulierung erhält man nun das Problem, eine Funktion der Form $C = f(A_i, x_j)$ mit

$$C = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left\{ \left[\sum_{i=1}^{v} a_i s^k \frac{\partial c_i}{\partial \left(\sum_j \sum_k a_i s^k x_j^k \right)} d\left(\sum_j \sum_k a_i s^k x_j^k \right) + \right.\right.$$

$$+ \sum_{i=v+1}^{v+w} a_i^k \frac{\partial c_i}{\partial \sum_j \sum_k a_i^k x_j^k} d\left(\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} a_i^k x_j^k \right) +$$

$$\left.\left. + t_{hj}^k c_t^k + t_j^k c_t^k \right] x_j^k \right\} \qquad (A\ 1.25)$$

1) Diese Form der partiellen Betrachtungsweise läßt sich auch als Totalableitung durchführen, doch soll auf die jeweiligen Vorteile und Nachteile nicht eingegangen werden. - Vgl. dazu: Krelle, W., Preistheorie, Tübingen-Zürich 1961, S. 75.

zu minimieren unter den Nebenbedingungen (A 1.13) bis (A 1.15), (A 1.16a) und (A 1.17)
($j = 1, 2, \ldots, m$; $k = 1, 2, \ldots, l$; $h = 1, 2, \ldots, p$; $i = 1, 2, \ldots, v, v+1, \ldots, v+w$).
Zu beachten ist dabei, daß auch die t^k_{hj}-Werte von dem Faktor i abhängig sind, damit aber auch von der Kostenabhängigkeit dieses Faktors, da bei Änderung des Kostensatzes eine Prozeßpunktänderung möglich ist.

Modell (1b2)

Neben dem Betriebsziel, die Produktionskosten zu minimieren, kann als weitere Forderung gestellt sein, die Ausnutzung der Schmelzaggregate zu maximieren. Dies kann erreicht werden durch unterschiedliche Bewertung der Stundenkosten entsprechend Fig. 19, wobei auch hier wieder ein Anreiz geschaffen werden muß durch eine Gewinnbeteiligung in Form von Produktionsprämien oder ähnlichem. In diesem Modell soll die Änderung des Kostensatzes c^k_t kontinuierlich, linear oder nichtlinear, angenommen werden. Eine solche Minimierung der Durchlaufzeit kann beispielsweise erreicht werden, wenn besserer Schrott eingesetzt wird, welcher dann aber auch höhere Kosten verursacht, so daß sich hier zwei Kosteneinflüsse mit gegensätzlichen Tendenzen ergeben. In einem solchen Fall läßt sich immer eine kostenminimale Situation finden (Fig. 21).

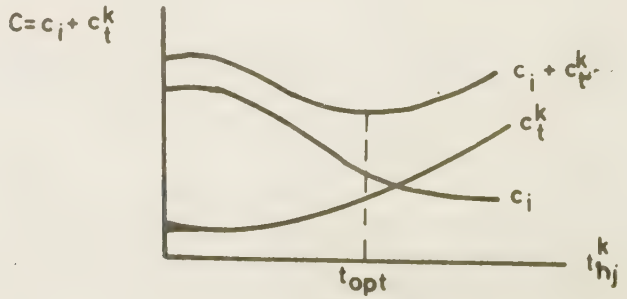

Fig.21

Da T^k, die insgesamt im Aggregat k zur Verfügung stehende Schmelzzeit, eine Konstante darstellt, kann sich nach

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{h=1}^{p} t_{hj}^k x_j^k + \sum_{j=1}^{m} t_j^k x_j^k \leq T^k \qquad \text{(A 1.16a)}$$

bei Änderung der Chargendauer ($\sum_{h=1}^{p} t_{hj}^k + t_j^k$) nur die Anzahl der möglichen ausgebrachten Chargen ändern, d.h.

$$(\sum_{h=1}^{p} t_{hj}^k + t_j^k) \hat{=} \frac{1}{d\, x_j^k} \qquad \text{(A 1.26)}$$

(das Symbol $\hat{=}$ bedeutet "proportional").
Damit erhalten wir nun das Problem in modifizierter Form: Minimiere

$$C = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left[(\sum_{i=1}^{v} a_i s^k c_i + \sum_{i=v+1}^{v+w} a_i^k c_i + \right.$$

$$\left. + t_{hj}^k \frac{\partial c_t^k}{\partial (\sum_{h=1}^{p} t_{hj}^k)} d\, x_j^k + t_j^k \frac{\partial c_t^k}{\partial t_j^k} d\, x_j^k) x_j^k \right] \qquad \text{(A 1.27)}$$

unter den Nebenbedingungen (A 1.13) bis (A 1.15), (A 1.16a) und (A 1.17).

Modell (1b3)

Neben den produktionsbedingten Daten der Modelle mit unabhängigen Kostensätzen soll hier als weitere Voraussetzung der Planung eine diskontinuierliche Abhängigkeit der Kostensätze der eingesetzten Faktoren angenommen werden. Die möglichen Fälle sind in Fig. 20 a-c dargestellt worden. Sowohl die Kostensätze wie die

dazugehörigen Mengenintervalle können in regelmäßiger oder unregelmäßiger Stufenhöhe und Stufenbreite eingeteilt sein. Daneben können mit zunehmander Menge die Preise der Faktoren steigen oder sinken.
Fig. 22a und b. stellen diese Fälle dar.

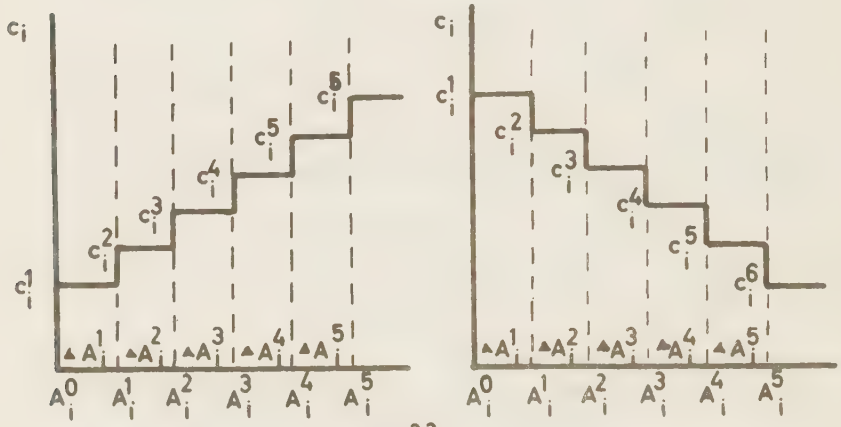

Fig.22

Da die eingesetzten Mengen des Faktors i über die Kostensätze c_i einen Parameter der Produktionskostenfunktion darstellen, muß diese Funktion in Abhängigkeit der Einsatzfaktormengen formuliert werden. Wird dabei die Gesamtmenge A_i in u Stufen q eingeteilt ($q = 1, 2, \ldots, u$), so daß

$$A_i^1 - A_i^0 = \Delta A_i^1 \; ; \; A_i^2 - A_i^1 = \Delta A_i^2 ; \quad \ldots ;$$

$$A_i^u - A_i^{u-1} = \Delta A_i$$

mit den zugehörigen Kostensätzen c_i^1, c_i^2, ..., c_i^u die jeweiligen Stufen bezeichnen, so erhält man

$$C = f(A_i, x_j) =$$

$$= \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left[\left(\sum_{i=1}^{v} a_i s^k c_i^q + \sum_{i=v+1}^{v+w} a_i^k c_i^q + \right. \right.$$

$$\left. \left. + t_{hj}^k c_t^k + t_j^k c_t^k \right) x_j^k \right]. \qquad \text{(A 1.28)}$$

Dabei ist $c_i^q = f(A_i^q)$.
Die Funktion (A 1.28) ist zu minimieren unter den Nebenbedingungen (A 1.13) bis (A 1.15), (A 1.16a) und (A 1.17). Sind die Mengen von A_i bekannt, so kann in der Ausgangslösung das entsprechende c_i^q der maximal verfügbaren Menge eingesetzt werden. In der darauf aufbauenden Optimallösung ist nun mittels der parametrischen linearen Programmierung [1] festzustellen, wie diese Optimallösung bei Änderung des Parameters c_i^q variiert und ob die erste Optimallösung das absolute Optimum in bezug auf die Produktionskosten darstellt.

2. Stochastische Modelle

In der Praxis der Stahlherstellung ist in sehr vielen Fällen keine Möglichkeit gegeben, eindeutig determinierte Daten zu erhalten, vielmehr können nur Wahrscheinlichkeitsverteilungen angegeben werden [2]. Solche stochastischen Größen können sich beziehen auf

a. die Bedarfsfunktion
b. die Chargendauer
c. die Beschränkungen.

1) Über die parametrische Lineare Programmierung wird im Abschnitt D dieses Teiles noch einiges zu sagen sein. Hier soll darauf nur hingewiesen werden.

2) Sind selbst solche Wahrscheinlichkeitsverteilungen nicht feststellbar dann ist eine Berechenbarkeit nicht gegeben, da keine mathematischen Beziehungen formuliert werden können. Solche Fälle scheiden von vorn herein aus unserer Betrachtung aus.

a. Stochastische Bedarfsfunktion

Es kann der Fall eintreten, daß nicht genügend hohe Auftragsbestände vorliegen, so daß die Produktionskapazitäten nicht voll ausgenutzt werden können. Soll dennoch die Produktion nicht unterbrochen werden, muß der künftige Bedarf für jedes einzelne Produkt auf Grund von Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgeschätzt werden. Dabei sind dann Unter- und Überproduktion bei speziellen Produkten möglich. Es liegt dann der Fall vor, die Chargenanzahlen so zu bestimmen, daß die gesamten Kosten ein Minimum werden, unter Berücksichtigung der wahrscheinlichen Unter- oder Überdeckung. Neben den Produktionskosten für das j-te Produkt werden dann aber auch Lagerkosten für diese Produkte auftreten. Eine Behandlung solcher Modelle führt sehr weit in das Gebiet der Lagerhaltungsmodelle hinein, für welche ausreichende Lösungsmethoden vor allem in der Arbeit von Peters [1] angegeben sind. Da Fälle, in denen nicht genügend Aufträge vorliegen bei spezifisch auftragsorientierten Produktionen immer Sonderfragen aufwerfen soll hier auf eine eingehende Erörterung dieser Problematik verzichtet werden. Diese Arbeit soll sich vorwiegend mit den Fragen der laufenden Produktionsplanung in Stahlwerken auseinandersetzen, nicht aber mit unnormalen Situationen.

---

1) Peters, B., a.a.O., S. 92 ff. In diesem Zusammenhang interessieren besonders die dort aufgezeigten stochastischen Modelle mit diskontinuierlicher Bedarfsfunktion S. 92 ff. - Vgl. auch Naddor, E., "Some Models of Inventory and an Application", Management Science, Vol. 2, 1955/56, S. 299 ff. - Arrow, J.K., Harris, T. und Marschak, J., "Optimal Inventory Policy", Econometrica, Vol. 19, 1951, S. 250 ff. - Elmaghraby, S.E., "An Approach to Linear Programming under Uncertaintiy", Operations Research, Vol. 7, 1959, S. 208 ff. - Krelle, W., Preistheorie, a.a.O., S. 89 ff.

b. Stochastische Chargendauer

Bisher sind wir davon ausgegangen, daß die Chargendauer nur von der Einsatzzusammensetzung und eventuell von einsatzunabhängigen Faktoren bestimmt wird. Diese Annahme ist aber durchaus nicht in allen Fällen zulässig. Die Chargendauer ist auch von der Einsatzfolge, vom Ofenalter, von der Arbeitsweise und vor allem auch von zufälligen Schwankungen im Betriebsablauf abhängig. Ein Teil dieser Einflüsse kann wohl exakt identifiziert, isoliert und analysiert werden unter der Annahme, daß die anderen Faktoren konstant bleiben. Wegen der großen Anzahl der Einflußgrößen auf die Produktion ist es aber für den Betrieb kaum möglich, sämtliche Größen völlig eindeutig anzugeben, Beispiele für zufällige Schwankungen sei der Schwefelgehalt von gekauftem Sammelschrott, von dem man nur angeben kann, in welchen Grenzen er regelmäßig sich einstellt. Da sich aber der Schwefelgehalt auf die Chargendauer auswirkt, kann dann auch diese nicht mehr genau angegeben werden.

Im Gegensatz zu den vorausgegangenen Modellen gilt für die folgenden die Chargendauer als stochastische Variable, deren Häufigkeitsverteilungsfunktion $p(t^k_{hj})$ jedoch bekannt ist. Es können nun die der Planung zugrunde liegenden Zeiten t^k_{hj} über- oder unterschritten werden. Im ersteren Fall kann insgesamt weniger, im zweiten Fall mehr in der Periode produziert werden. Das wirkt sich selbstverständlich auch auf die Gesamtkosten der Produktion aus, deren Minimierung nach wie vor unser Ziel ist. Wird die tatsächlich benötigte Zeit, als Funktion der Einsatzzusammensetzung, mit t'^k_{hj} bezeichnet, so sind folgende Fälle möglich:

aa. bei Planzeitüberschreitung ($t'^{k}_{hj} > t^{k}_{hj}$)

Die Wahrscheinlichkeit, daß $t'^{k}_{hj} > t^{k}_{hj}$ gilt, ist durch $P(t^{k}_{hj})$ gegeben, so daß die Kosten der Planzeitüberschreitung die Form annehmen:

$$P(t^{k}_{hj})\; c^{k}_{t}\; (t'^{k}_{hj} - t^{k}_{hj})\; x^{k}_{j}. \qquad \text{(A 2.1)}$$

Ist $t'^{k}_{hj} = t^{k}_{hj}$, so sinken die Kosten der Planzeitüberschreitung auf den Wert Null.

bb. bei Planzeitunterschreitung ($t'^{k}_{hj} < t^{k}_{hj}$)

Die Wahrscheinlichkeit, daß $t'^{k}_{hj} < t^{k}_{hj}$ gilt, soll durch $Q(t^{k}_{hj})$ gekennzeichnet sein. Die entsprechenden Kosten der Unterschreitung sind dann

$$Q(t^{k}_{hj})\; c^{k}_{t}\; (t^{k}_{hj} - t'^{k}_{hj})\; x^{k}_{j}\;. \qquad \text{(A 2.2)}$$

Die Gesamtkosten, die bei Über- oder Unterschreitung der geplanten Zeit zu erwarten sind, ergeben sich dann mit

$$C^{k}_{j} = P(t^{k}_{hj})c^{k}_{t}(t'^{k}_{hj} - t^{k}_{hj})x^{k}_{j} + Q(t^{k}_{hj})c^{k}_{t}(t^{k}_{hj} - t'^{k}_{hj})x^{k}_{j}\;. \qquad \text{(A 2.3)}$$

Unterstellen wir, daß die Produktionsverhältnisse von Modell (1a2) in abgeänderter Form vorliegen, dann ergeben sich die Gesamtkosten zu

$$C = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left\{ \left[\sum_{i=1}^{v} a_i s^{k} c_i + \sum_{i=v+1}^{v+w} a^{k}_{i} c_i + \right.\right.$$

$$\left.\left. + P(t^{k}_{hj})c^{k}_{t}(t'^{k}_{hj} - t^{k}_{hj}) + Q(t^{k}_{hj})c^{k}_{t}(t^{k}_{hj} - t'^{k}_{hj}) \right] x^{k}_{j} \right\}\;. \qquad \text{(A 2.4)}$$

Für die Bestimmung von $P(t_{hj}^k)$ und $Q(t_{hj}^k)$ können

a. diskontinuierliche oder diskrete und
b. kontinuierliche

Häufigkeitsverteilungen vorliegen. Dementsprechend werden die Modelle (2b1) und (2b2) gebildet werden.

Modell (2b1) [1]

Sollen die diskreten Häufigkeitsverteilungen der Chargendauer t_{hj}^k mit $p(t_{hj}^{kw})$ mit den Definitionspunkten w (w = 1, 2, ..., r) gegeben sein, dann bedeutet das:

$$t_{hj}^{kw} \geq 0; \quad p(t_{hj}^{kw}) \geq 0; \quad \sum_{w=1}^{r} p(t_{hj}^{kw}) = 1.$$

Dann erhält man die zu nimimierende Gesamtkostenfunktion in der Form

$$C = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left\{ \left[\sum_{i=1}^{v} a_i s^k c_i + \sum_{i=w+1}^{v+w} a_i^k c_i + \right. \right.$$

$$+ \sum_{t_{hj}^{kw}=0}^{t_{hj}^{kw}=t_{hj}^k} (t_{hj}^{\prime k} - t_{hj}^k) c_t^k \, p(t_{hj}^{kw}) +$$

$$\left. \left. + \sum_{t_{hj}^{kw}=t_{hj}^k+1}^{\infty} (t_{hj}^k - t_{hj}^{\prime k}) c_t^k \, p(t_{hj}^{kw}) \right] x_j^k \right\} . \quad \text{(A 2.5)}$$

Weiterhin gelten die allgemeinen Nebenbedingungen

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} r_{ij}^k x_j^k \gtrless d_i \qquad \text{und}$$

$$x_j^k \geq 0 \text{ , ganzzahlig!}$$

(j = 1, 2, ..., m; k = 1, 2, ..., l; h = 1, 2, ..., p; i = 1, 2, ..., v, v+1, ..., v+w)

1) Vgl. Peters, B., a.a.O., S. 95 ff.

bzw. die Nebenbedingungen (A 1.13) bis (A 1.15), (A 1.16a) und (A 1.17).

Nach dieser Umformung sind nun die Chargenanzahlen so zu bestimmen, daß die Funktion (A 2.5) ein Minimum wird.

Modell (2b2)

Die Verteilungsfunktion soll in diesem Fall kontinuierlich sein. An Stelle der Summenbildung im Modell (2b1) wird hier für das Intervall 0 bis ∞ integriert. Es ist demnach

$$C = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left\{ \left[\sum_{i=1}^{v} a_i s^k c_i + \sum_{i=v+1}^{v+w} a_i^k c_i + \int_0^{t_{hj}^k} (t_{hj}'^k - t_{hj}^k) c_t^k \, p(t_{hj}^k) d(t_{hj}^k) + \int_{t_{hj}^k}^{\infty} (t_{hj}^k - t_{hj}'^k) c_t^k \, p(t_{hj}^k) d(t_{hj}^k) \right] x_j^k \right\} \quad \text{(A 2.6)}$$

zu minimieren unter den Nebenbedingungen (A 1.13) bis (A 1.15), (A 1.16a) und (A 1.17).

c. Stochastische Beschränkungen

Außer den bisher angeführten stochastischen Fällen kann ein solches Modell auch durch die Beschränkungen bedingt sein. Der Fall, daß M_j, also die Bedarfsmenge, stochastischer Natur ist, wurde bereits betrachtet. Stochastische Beschränkungen der Einsatzfaktormengen können ebenfalls auftreten, wenn nicht eindeutig festgelegt werden kann, welche Menge zu welchem Preis im

im Planungszeitraum beschaffbar ist. Wir wollen hier speziell den Fall betrachten, daß die Verfügbarkeit bestimmter Aggregate nicht von vorn herein festgelegt werden kann. Dies ist gegeben, wenn für die Schmelzaggregate die erforderliche Reparatur- und Stillstandszeit nicht eine deterministische Größe darstellt, sondern der Planung als wahrscheinlicher Wert zugrunde liegt.

Die Wahrscheinlichkeit, daß das Aggregat k in der Periode T insgesamt T^k Stunden zur Verfügung steht, sei $p(T^k)$. Nach (A 1.16a) ist T^k gegeben mit

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left(t_{hj}^k x_j^k + t_j^k x_j^k\right) \leq T^k .$$

Mit einer Änderung von T^k ändert sich, bei deterministischer Chargendauer, die ausgebrachte Produktmenge x_j^k. Ist T^k eine stochastische Variable, so ist damit also auch x_j^k stochastisch, da

$$\sum_{j=1}^{m} x_j^k = f\left[p(T^k)\right] .$$

Wird (A 1.16a) umgeformt in

$$\sum_{j=1}^{m} \left(\sum_{h=1}^{p} t_{hj}^k + t_j^k\right) x_j^k = T^k \quad ^{1)},$$

so ist der Klammerausdruck $\left(\sum_{h=1}^{p} t_{hj}^k + t_j^k\right)$ eine der Chargenanzahl proportionale Größe, während die Anzahl der zu erschmelzenden Chargen x_j^k mit der Größe von T^k variiert.

Die gesamt zur Verfügung stehende Schmelzzeit T^k kann nun über- oder unterschritten werden. Wird die tat-

1) In diesem Fall wird das Gleichheitszeichen gesetzt, um auszudrücken, daß die Schmelzzeit sich als angegebene Summe der Chargendauer errechnen läßt.

sächlich verfügbare Zeit mit T'^k bezeichnet, dann sind folgende Fälle möglich:

aa. bei Planzeit-Überschreitung $(T'^k > T^k)$

Die Wahrscheinlichkeit, daß $T'^k > T^k$ gilt, ist durch $P(T^k)$ gegeben. Die Kosten der zusätzlich möglichen Produktion sind dann gegeben mit

$$C = c_j \frac{T'^K - T^K}{\sum_{j=1}^{m} x_j^k} \qquad \text{(A 2.7)}$$

wobei c_j die Kosten einer Charge des Produktes j sind, und demnach gilt

$$C = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left\{ \left[\sum_{i=1}^{v} a_i s^k c_i + \sum_{i=v+1}^{v+w} a_i^k c_i + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \left(\sum_{h=1}^{p} t_{hj}^k + t_j^k \right) c_t^k \right] x_j^k \right\} .$$

Da aber die Kosten einer Zeiteinheit im Aggregat k, also c_t^k, von der Summe der insgesamt verfügbaren Stunden abhängt, gilt

$$c_t^k = \frac{C^k}{T^k} ,$$

mit C^k = Gesamtkosten des Aggregates k im Planungszeitraum, und weiter

$$c_t^{k'} = \frac{C^k}{T^{k'}} .$$

Damit erhält man:

$$C = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left\{ \left[\sum_{i=1}^{v} a_i s^k c_i + \sum_{i=v+1}^{v+w} a_i^k c_i + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \left(\sum_{h=1}^{p} t_{hj}^k + t_j^k \right) c_t'^k \, P(T'^k) \right] x_j^k \right\} . \qquad \text{(A 2.8)}$$

bb. bei Planzeit-Unterschreitung $(T'^k < T^k)$

Die Wahrscheinlichkeit, daß $T'^k < T^k$ gilt, soll durch $Q(T^k)$ gegeben sein. Entsprechend erhält man die Kosten der Planzeitunterschreitung

$$c_t'^k \quad Q(T^k) \quad (\sum_{h=1}^{p} \quad t_{hj}^k \quad + t_j^k) \quad x_j^k \ .$$

Die Gesamtkosten, die bei Über- oder Unterschreitung der geplanten Schmelzzeit zu erwarten sind, betragen dann

$$\mathfrak{G} = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left\{ \left(\sum_{i=1}^{v} \quad a_i s^k c_i \quad + \sum_{i=v+1}^{v+w} \quad a_i^k c_i \quad + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \ (\sum_{h=1}^{p} \quad t_{hj}^k + t_j^k) \left[P(T^k) + Q(T^k) \right] \right) \quad x_j^k \right\} . \qquad \text{(A 2.9)}$$

Für die Bestimmung von $P(T^k)$ und $Q(T^k)$ können diskrete oder kontinuierliche Häufigkeitsverteilungsfunktionen vorliegen. Entsprechend werden die Modelle (2c1) und (2c2) zu bilden sein.

Modell (2c1)

Sollen die diskreten Häufigkeitsverteilungen der Schmelzzeit T^k mit $P(T^{kw})$ gegeben sein, dann bedeutet das:

$$T^{kw} \geq 0; \quad p(T^{kw}) \geq 0; \quad \sum_{w=1}^{r} \quad p(T^{kw}) \quad = 1 \ .$$

Die zu minimierende Gesamtkostenfunktion erhält dann die Form:

$$C = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \Bigg\{ \Bigg[\sum_{i=1}^{v} a_i s^k c_i + \sum_{i=v+1}^{v+w} a_i^k c_i + \sum_{T^{kw}=0}^{T^{kw}=T^k} \Big(\sum_{h=1}^{p} t_{hj}^k + t_j^k \Big) (T'^k - T^k)\, p(T^{kw}) c_t^k + \sum_{T^{kw}=T^{k,w+1}}^{\infty} \Big(\sum_{h=1}^{p} t_{hj}^k + t_j^k \Big) (T^k - T'^k)\, p(T^{kw}) c_t^k \Bigg] x_j^k \Bigg\} \qquad \text{(A 2.10)}$$

Dabei gelten die allgemeinen Nebenbedingungen

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} r_{ij}^k x_j^k \begin{matrix} \geq \\ = \\ \leq \end{matrix} d_i$$

$$x_j^k \geq 0 \text{ , ganzzahlig !}$$

$(j = 1, 2, \ldots, m;\ k = 1, 2, \ldots, l;\ h = 1, 2, \ldots, p;$
$i = 1, 2, \ldots, v, v+1, \ldots, v+w)$

bzw. die Nebenbedingungen (A 1.13) bis (A 1.15), (A 1.16a) und (A 1.17).

Modell (2c2)

Die Verteilungsfunktion soll in diesem Modell kontinuierlichen Verlauf haben. An Stelle der Summenbildung im Modell (2c1) tritt hier die Integration im Bereich von 0 bis ∞. Demnach ist die Funktion

$$C = \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \Bigg\{ \Bigg[\sum_{i=1}^{v} a_i s^k c_i + \sum_{i=v+1}^{v+w} a_i^k c_i + \int_{0}^{T^k} \Big(\sum_{h=1}^{p} t_{hj}^k + t_j^k \Big) (T'^k - T^k)\, p(T^k) c_t^k\, d(T^k) + \int_{T^k}^{\infty} \Big(\sum_{h=1}^{p} t_{hj}^k + t_j^k \Big) (T^k - T'^k)\, p(T^k) c_t^k\, d(T^k) \Bigg] x_j^k \Bigg\}. \qquad \text{(A 2.11)}$$

zu minimieren unter den Nebenbedingungen (A 1.13) bis (A 1.15), (A 1.16a) und (A 1.17).

Dieser Fall stochastischer Beschränkungen könnte nun auch für andere mögliche Faktoren durchgeführt werden. Derartige Ableitungen sind aber ganz parallel durchzuführen und bringen prinzipiell keinerlei wesentlich neue Gesichtspunkte in unsere Überlegungen hinein. Deswegen wollen wir von einer derartigen Betrachtung absehen.

B. PRODUKTIONSDURCHFÜHRUNGSPLANUNGSMODELLE

1. Die spezielle Problemstellung

Nachdem in der Produktionsprogrammplanung für ein gegebenes Stahlwerk bei gegebener Auftragslage die Ausbringung unter optimalen Einsatzbedingungen in bezug auf die gesamten Produktionskosten festgelegt ist, bleibt die Frage des Produktionsablaufes zu klären.

Unterschiedliche Stahlwerksprodukte haben nicht nur jeweils verschiedene Chargendauer während des Schmelzprozesses, sondern auch die Gießzeiten und die Standzeiten in der Kokille sind qualitätsabhängig. Während der gesamten Gieß- und Standzeit einer Charge ist jeweils eine Gießbühne, oder, falls in Gruben abgegossen wird, eine Gießgrube blockiert und kann nicht anders benutzt werden. Da in den meisten Werken die Anzahl der Gießaggregate geringer ist als die Anzahl der vorhandenen Öfen kann es hierdurch zu manchmal erheblichen Wartezeiten kommen, weil keine Abgießmöglichkeit für eine an sich schon fertige Schmelze besteht. Eine solche Charge muß dann im Ofen behalten werden, sie verbraucht zusätzliche Energie und blokkiert das entsprechende Schmelzaggregat. Ebenso wie

bei Gießbühne bzw. Gießgrube können andere Betriebsaggregate Engpässe darstellen, wodurch Leerzeiten oder Wartezeiten entstehen, die zusätzliche Kosten verursachen. Der Idealfall eines völlig reibungslosen Produktionsablaufes ohne irgendwelche Leer- oder Wartezeiten ist nur schwer zu erreichen, weil die Daten nicht genau bekannt, sondern oft nur als wahrscheinliche Werte angegeben werden können. Um die gesamten Produktionskosten zu minimieren muß versucht werden, den Produktionsablauf so zu gestalten, daß eine optimale Chargenfolge bestimmt wird. Dies soll die Aufgabe der Produktionsdurchführungsplanung in Stahlwerken sein und hierzu sollen entsprechende Lösungsmöglichkeiten angeführt werden.

Es stellt sich folgende Ausgangsituation dar:

In der Planungsperiode T sollen in k Schmelzaggregaten insgesamt

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} x_j^k$$

Chargen der Produkte j erschmolzen und auf den Gießaggregaten g (g = 1, 2, ..., s) abgegossen werden, und zwar so, daß die Gesamtzeit ein Minimum wird, d.h. daß die auftretenden Wartezeiten gegen den Wert Null gehen. Sowohl die Chargendauer als auch Gieß- und Standzeiten jeder Charge stellen Plandaten dar, die entweder exakt bestimmt oder mit gegebener Wahrscheinlichkeit bekannt sind. Die Gesamtzeit stellt sich demnach dar aus der Summe von Chargendauer t_j^k, der Abgießzeit t_a und der Standzeit t_s:

$$t_{ges} = t_j^k + t_{aj} + t_{sj} .$$

Der Einfachheit wegen soll angenommen werden, daß nur

ein einziges Kokillenformat abgegossen wird, wodurch eine weitere Aufteilung der Gießzeiten entsprechend den unterschiedlichen Blockgrößen vermieden wird. Denn es ist offensichtlich, daß eine Charge von gegebenem Gewicht, die in nur wenigen großen Kokillen vergossen wird, eine geringere Zeit benötigt für den Abguß, als die gleiche Charge benötigen würde, wenn sie auf viele kleinere Blöcke verteilt wird, da die Umstellung von einem Block zum nächsten Zeit beansprucht. Je weniger solcher Umstellungen, während derer die Gießpfanne verschlossen sein muß, vorgenommen werden müssen, umso geringer wird die Gesamtgießzeit sein. Ebenso verhält es sich natürlich, wenn nicht einzelne Blöcke vergossen werden, sondern wenn mehrere zu einem "Gespann" zusammengefaßt werden.

Diese Annahme mag zunächst wirklichkeitsfremd erscheinen, da in vielen Fällen die Aufträge unterschiedlich gestückelt sind und daher auch verschiedene Blockgrößen gefordert werden müssen. Es läßt sich jedoch durch Einführung neuer Variabler und Hinzufügen eines weiteren Index zu den x_j^k-Werten auf unterschiedliche Kokillenformate und damit unterschiedliche Gießzeiten Rücksicht nehmen. Da dies aber keine grundsätzlich neuen Erkenntnisse für die Produktionsplanung bringt, dagegen die Übersichtlichkeit der Modelle erheblich beeinträchtigen würde, soll darauf verzichtet werden, von der eben angedeuteten Möglichkeit Gebrauch zu machen.

Da die Standzeit außer von der Stahlsorte vor allem vom Kokillenformat abhängig ist (größere Kokillen brauchen längere Standzeiten), kann unter der Voraussetzung eines einzigen Kokillenformates die Standzeit als Funktion nur der Produktart angenommen werden. Da dann auch die Gießdauer nur von der Stahlsorte abhängig ist,

gleiche Abstichtemperatur und gleiches Gießverfahren vorausgesetzt, können Gießzeit und Standzeit zu einer einzigen Zeitgröße zusammengefaßt werden. Wir haben dann den Fall, daß zwei Arbeitsstellen von m Arbeiten in festgesetzter Reihenfolge durchlaufen werden.

2. Vorhanden Ablaufplanungsmodelle und deren Anwendungsmöglichkeit auf den Stahlwerksbetrieb

Es gilt nun, die anfallenden Chargen zeitlich so nacheinander einzusetzen, daß nach Möglichkeit keine Wartezeiten anfallen bzw. diese minimiert werden. Für solche Reihenfolgeprobleme (Sequencing Problems) sind bisher zufriedenstellende Lösungen aus der Literatur nur für drei Spezialfälle bekannt [1]:

aa) m Arbeiten werden auf zwei Arbeitsstellen A und B ausgeführt, wobei alle Arbeiten in der Reihenfolge A-B den Prozeß durchlaufen.

bb) m Arbeiten und drei Arbeitsstellen sind gegeben, die in der Reihenfolde A-B-C durchlaufen werden sollen.

cc) Zwei Arbeiten sollen k Betriebsaggregate durchlaufen, wobei jede Arbeit auf vorgeschriebenem Wege den Prozeß passiert. Diese Reihenfolgen brauchen nicht notwendig bei beiden Arbeitsn gleich zu sein.

Alle diese Modelle unterliegen aber einigen weiteren Bedingungen, die eine Anwendung für die Produktionsdurchführungsplanung in Stahlwerken nicht erlaubt. Diese Bedingungen sind [2]:

aa) Der Weg, auf dem für ein spezielles Produkt die einzelnen Aggregate durchlaufen werden müssen, muß eindeutig festgelegt sein. Diese Bedingung ist für das Stahlwerk in jedem Fall erfüllt.

---

1) Sasieni, M., Yaspan, A. und Friedman, L., Operations Research, Methods and Problems, New York 1959, S. 251. - Vgl. Churchman, C.W. et al., a.a.O., S. 409 ff, besonders S. 423. - Johnson, S.M., "Optimal Two- and Three-Stage ...", a.a.O., S. 429 ff. - Swarc, W., "Solutions to the Akers-Friedman Scheduling Problem", Operations Research, Vol, 8, 1960, S. 782 ff.

2) Vgl. Churchman, C.W. et al., a.a.O., S. 409 ff.

bb) Es darf nicht mehr als ein Aggregat gleichen Typs vorhanden sein. Besonders diese Bedingung schränkt die Anwendungsmöglichkeit auf den Stahlwerksbetrieb entscheidend ein.

cc) Die Maschinenzeiten und Kosten dürfen nicht stochastischer Natur sein.

dd) Das Bedienungspersonal oder Bedienungsaggregate müssen jederzeit verfügbar sein.

Unter diesen Bedingungen ist nur das Modell (1a1) lösbar, wenn nur ein einziges Schmlezaggregat vorhanden ist. Da aber in solchen Fällen, wo es sich um Siemens-Martin- oder Elektrostahlwerke handelt, die Chargendauer durchweg größer als Gießzeit und Standzeit zusammen ist, d.h. $t_j^k > t_{aj} + t_{sj}$, ergeben sich keine Reihenfolgeprobleme, die Reihenfolge ist beliebig. In einem Thomasstahlwerk sind die Chargenzeiten in aller Regel geringer als Gießdauer plus Standzeit, so daß ein einziges Gießaggregat nicht ausreicht. Damit ist aber die Voraussetzung bb) nicht mehr erfüllt. Alle anderen Modelle sind mit diesen einfachen Reihenfolgemodellen nicht lösbar.

Da die bisher bekannten Ablaufplanungsmodelle mit exakt arbeitenden mathematischen Methoden beim Stahlwerksbetrieb versagen, soll im Folgenden versucht werden, aus allgemeinen Voraussetzungen eine Annäherung an die optimale Lösung der auftretenden Probleme zu erreichen.

3. Simulationsverfahren zur Lösung von Ablaufplanungsproblemen im Stahlwerk

Bei parallel arbeitenden gleichartigen Aggregaten sind keine exakten mathematischen Verfahren bekannt, welche die Festlegung einer optimalen Reihenfolge garantieren. Deshalb muß durch Annäherung versucht werden, ein durchführbares Programm zu bestimmen und von einem

solchen ausgehend nach Verbesserungen in Richtung auf eine Minimierung der Durchlaufzeit zu suchen. Die dabei anzuwendenden Verfahren sind Simulationsverfahren [1], deren Anwendungsbereich im Folgenden für den Fall des Stahlwerksbetriebes beschrieben werden soll.

Zunächst wird auf Grund gegebener Daten ein durchführbares Programm gesucht, wobei die einzige Bedingung ist, daß keine Wartezeiten in den Schmelzaggregaten auftreten, d.h. diese Aggregate sollen stets voll ausgenutzt werden. Ist eine Charge fertig erschmolzen, muß ein Gießaggregat zum Abgießen bereitstehen. Bei nur wenigen Chargen, wenn beispielsweise Tagesprogramme aufgestellt werden sollen, genügen bereits ganz einfache optische Hilfsmittel, wie es die Gantt-Diagramme sind [2]. Da diese Methode hinreichend bekannt ist soll diese einfache Art der Simulation hier nicht näher ausgeführt werden. Bei größeren und komplizierteren Problemen ist dieses Verfahren aber zu zeitraubend und zu unübersichtlich, so daß Rechenverfahren unter Einschaltung von elektronischen Rechenautomaten angewendet werden müssen.

Wenn das geplante Programm durchführbar sein soll, darf die gesamt erforderliche Gießzeit plus Standzeit nicht die Dauer der Planungsperiode überschreiten bzw. nicht größer sein als die verfügbare Einsatzzeit der Gießaggregate. Sind die Gießzeit einer Charge des Produktes j, welche im Aggregat k erschmolzen wird (sind die Aggregate gleich groß, so braucht der Index k nicht zu erscheinen) mit t^k_{aj} und die Standzeit mit t^k_{sj}

1) Vgl. Bisson, R.L., "Sequencing Theory" in: Ackoff, R.L. (ed.), a.a.O., S. 311 ff.

2) Vgl. Churchman, C.W. et al., a.a.O., S. 411.

Daten der Planung, so muß

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} (t_{aj}^{k} + t_{sj}^{k})\, x_{j}^{k} \leq T \qquad \text{(B 3.1)}$$

sein. Im Falle, daß

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} (t_{aj}^{k} + t_{sj}^{k})\, x_{j}^{k} > T$$

ist, kann das entsprechende Programm nicht durchgeführt werden. Es muß dann ein anderes Produktionsprogramm gewählt werden. Diese Bedingung kann bereits als zusätzliche Beschränkungsgleichung in den Produktionsprogrammplanungsmodellen eingeführt werden. Die Ungleichung (B 3.1) ist für die Durchführbarkeit des Programmes wohl eine notwendige, aber noch keine ausreichende Bedingung. Auf diese Weise können jedoch eine Reihe unmöglicher Programme bereits ausgeschaltet werden. Sind mehrere Gießaggregate vorhanden ($g = 1, 2, \ldots, s$), so ändert sich (B 3.1) in

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} (t_{aj}^{k} + t_{sj}^{k})\, x_{j}^{k} \leq \sum_{g=1}^{s} T^{g} . \qquad \text{(B 3.2)}$$

Auf dieser Bedingung baut das anschließende Simulationsverfahren aus.

a. Allgemeine Grundlage der Simulationsverfahren

Simulation ist "... the technique of setting up a stochastic model of a real situation and then performing sampling experience upon the model " [1]. Auf dieser Arbeitsdefinition baut das Verfahren im Einzelnen auf. Dabei werden folgende Schritte durchgeführt: [2]

1) Harling, J., "Simulation Technique in Operations Research - A Review", Operations Research, Vol. 6, 1958, S. 307. - Vgl. Moss, J.H., "Commentary on Harling's 'Simulation Technique in Operations Research'", Operations Research, Vol. 6, 1958, S. 591 ff. - Morgenthaler, G.W., "The Theory and Application of Simulation in Operations Research" in: Ackoff, R.L.(Hrsg.), a.a.O., S. 376 ff.

2) Vgl. Harling, J., a.a.O., S. 314.

1. Das reale System wird auf ein logisches Flußdiagramm zurückgeführt
2. Die für das Modell notwendigen Daten werden bestimmt und auf eine angemessene Form gebracht.
3. Das Modell wird stückweise auf einem Tischrechner oder mit anderen einfachen Hilfsmitteln geprüft.
4. Das Flußdiagramm wird auf eine angemessene Programmierungsform für Elektronenrechner gebracht (Übersetzung des Flußdiagramms mittels eines Programmierungscodes).
5. Berechnung und Kontrolle des Modelles
6. Interpretation des Ergebnisse.

In dieser Arbeit, wo es nicht auf praktische Ergebnisse ankommt, beschränken wir uns auf die ersten zwei Punkte. Dabei sollen die Grundsätze dargestellt werden, nach welchen das Flußdiagramm gebildet wird.

b. Grundsätze für das Aufstellen eines Flußdiagramms

Es sind bei der Aufstellung eines Flußdiagramms für das hier auftretende Pröblem sechs Schritte erforderlich:

1. Aus der Gesamtzahl der zu produzierenden Chargen ist zum Zeitpunkt T_o jedem Aggregat zunächst eine Charge zuzuteilen. Welche Wahl getroffen wird ist im Anfang beliebig. Zu jeder ausgewählten Charge sind die dazugehörigen Zeiten bekannt [1], also Chargendauer, Gießdauer und Standzeit.
2. Jede Charge ist einem Gießaggregat zuzuweisen, so, daß keine Wartezeiten auftreten können.
3. Jedem freiwerdenden Schmelzaggregat ist erneut eine Charge zuzuweisen. Dabei ist darauf zu achten, wann auf Grund der bereits eingesetzten Chargen das nächste Gießaggregat frei wird. Entsprechend ist eine

1) Sind stochastische Zeiten gegeben müssen unter Umständen Sicherheitszuschläge eingeführt werden.

Charge auszuwählen, deren Schmelzdauer gleich oder größer als diese Zeit ist. Andererseits ist aber darauf zu achten, daß die Leerzeiten in den Gießaggregaten minimal gehalten werden.

4. Läßt sich keine Charge finden, welche den unter 3. geforderten Bedingungen genügt, so liegt eine unzulässige Reihenfolge vor.

5. Bei einer unzulässigen Reihenfolge ist das bisherige Ablaufprogramm solange abzuändern, bis eine zulässige Folge gefunden wird.

6. Das Verfahren von 1. bis 5. ist so lange zu iterieren, bis alle Chargen innerhalb der gegebenen Bedingungen einen Platz im Ablaufprogramm haben.

Zu diesen allgemeinen verbalen Bemerkungen zur Aufstellung von Flußdiagrammen sind noch einige weitere Aussagen notwendig. Dabei sollen vor allem die oben genannten Auswahlkriterien mathematisch formuliert werden.

zu 1. Werden die Gesamtzahl der zu produzierenden Chargen

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} x_j^k$$

mit V bezeichnet, wobei V die höchste von S Zahlen bedeuten soll (S = 1, 2, ..., V), so ist im Zeitpunkt T_0^k, am Beginn der Planungsperiode, jedem Aggregat einer dieser S-Werte zuzuordnen. Dabei ist darauf zu achten, daß jedes S nur ein einziges Mal vorkommen darf. Zu jedem S gehören eindeutig bestimmte, möglicherweise stochastische, Zeiten. Der Endpunkt des Schmelzprozesses wird dann nach der ersten Charge im Aggregat k durch

$$T_0^k + (t_{hj}^k + t_j^k)_S = T_1^k$$

bestimmt. Zu diesem Zeitpunkt T_1^k wird die Charge an eines der vorhandenen Gießaggregate zugewiesen.

zu 2. Die Durchlaufzeit der ersten Charge ist dann insgesamt

$$T_0^k + t_{hj}^k + t_j^k + t_{aj}^k + t_{sj}^k = T_1^k + t_{aj}^k + t_{sj}^k = T_1^g .$$

Zum Zeitpunkt T_1^g verläßt die Charge S den Stahlwerksbereich. Diese Charge erhält in einer neuen Reihe R (R = 1, 2, ..., W) die Rangnummer 1.

zu 3. Ist das Aggregat k im Zeitpunkt T_1^k frei geworden, wird ein anderes S' aus der Reihe ausgewählt [1]. Diese Charge ist im Zeitpunkt

$$T_1^k + (t_{hj}^k + t_j^k)_{S'} = T_2^k$$

fertig. Nun ist zu prüfen, ob ein Gießaggregat vorhanden ist, für welches gilt

$$T_S^g \leq T_2^k .$$

Ein solches freies Gießaggregat ist auszuwählen. Sind mehrere Möglichkeiten für die Auswahl gegeben, so wähle man dasjenige, für welches

$$T_2^k - T_S^g = \text{Min!}$$

Dadurch ist gewährleistet, daß die Leerzeiten in den Gießaggregaten minimiert werden.

Findet sich kein freies Gießaggregat, so ist ein anderes S' zu suchen, für welches die Bedingungen

$$T_{S'}^k \geq T_{S'}^g \qquad \text{(B 3.3)}$$

für beliebiges g gilt.

---

1) Dabei ist auf spezielle Reihenfolgepräferenzen, wie sie unter Teil II, B 2c dieser Arbeit beschrieben wurden, Rücksicht zu nehmen, wenn sich bestimmte Reihenfolgen ausschließen.

zu 4. Kann kein solches Element in der Reihe S gefunden werden so ist eine unzulässige Reihenfolge ausgewählt worden.

zu 5. In diesem Fall ist ein anderes S als Anfangsglied der Reihe auszuwählen und der Rechenvorgang ist von vorn zu beginnen.

zu 6. In diesem Sinne wird fortgeschritten, bis sich irgendwo eine unzulässige Reihenfolge ergibt. Das dem zuletzt geprüften Element vorangegangen in der Reihe R (R-1) ist aus dieser Reihe zu entfernen und eine neue zulässige Lösung zu suchen. Läßt sich eine solche nicht finden, entfernt man auch (R-2) und so fort. Auf diese Weise wird so lange verfahren, bis alle Zahlen S in der Lösung sind und eine neue Reihe R bilden.

Mit diesem Verfahren ist nicht garantiert, daß eine optimale Reihenfolge gefunden wird. Wenn eine Lösung existiert ist aber sicher, daß diese gefunden wird. Existieren mehrere Lösungen, so wird eine von ihnen bestimmt. Durch mehrmaliges Durchspielen des Problems könnte aber versucht werden, eine Annäherung an das Optimum zu finden, wenn mehrere Möglichkeiten für Ablaufreihen gefunden werden. Aus diesem kann dann die jeweils günstigste ausgewählt werden. Garantiert werden kann mit diesem Verfahren, daß, falls eine Lösung existiert, eine optimale Ausnutzung der Schmlezaggregate auf Grund des vorher festgesetzten Produktionsprogrammes gewährleistet ist.

Je nach den betrieblichen Gegebenheiten kann aber auch eine andere Aufgabenstellung gefordert sein, nämlich daß die Gießaggregate voll ausgenutzt werden und Leerzeiten in den Schmelzaggregaten in Kauf genommen werden.

Diese Umkehrung des eben ausgeführten Problems braucht hier nicht beschrieben werden, da der Rechengang grundsätzlich der gleiche bleibt, es kehrt sich nur das Ungleichheitszeichen in (B 3.3) um zu

$$T_S^k \leq T_S^g .$$

C. GESAMTMODELLE FÜR DIE PRODUKTIONSPLANUNG

Wie schon betont, sind bisher keine Verfahren bekannt, die es gestatten, Produktionsprogrammplanungsprobleme und Ablaufplanungsprobleme simultan zu lösen. Beide Probleme sind daher in getrennten Schritten anzufassen. Wie stark aber die gegenseitigen Beziehungen sind, ist besonders im Abschnitt B dieses Teiles der Arbeit deutlich geworden, weil die gesamte Ablaufplanung zunächst das optimale Produktionsprogramm als Datum voraussetzt. Die umgekehrte Beeinflussung der Produktionsprogrammplanung durch die Produktionsdurchführungsplanung ist dagegen nicht in derselben Weise evident geworden. Tatsächlich sind bei auftragsorientierten Betrieben diese Bezüge auch nicht so stark hervorzuheben. Daß sie dennoch bestehen ist aber offensichtlich durch die Feststellung gegeben, daß undurchführbare optimale Programme abgeändert werden müssen. Dazu bietet sich die Möglichkeit, an Stelle der im Rahmen des Linearen oder Nichtlinearen Programmierens gefundenen optimalen Lösungen die jeweils zweitbeste, drittbeste usw. Lösung der Ablaufplanung zugrunde zu legen und aus dieser eine zulässige Reihenfolge der zu produzierenden Chargen zu entwickeln. Darüber hinaus können speziell durch die Ablaufplanungsprobleme bedingte Beschränkungen in die Produktionsprogrammplanung einbezogen werden etwa in der Form der Nebenbedingung (B 3.1). Die Anzahl der denkbaren

Beziehungen zwischen diesen beiden Problemkreisen im Stahlwerksbereich ist so unübersichtlich groß, daß sich daraus keine allgemeinen Formulierungen ableiten lassen. Hier ist es Sache spezieller, auf einen bestimmten Betrieb abgestellter, Überlegungen, weitere Bedingungen zu finden, die vornehmlich das Verfahren der Simulation durch spezielle Beschränkungen eingrenzen, welche aber auch umgekehrt die Feststellung des Produktionsprogrammes aus der Sicht der Ablaufplanung beeinflussen können.

D. DIE VERFAHREN DER LÖSUNG DER ANGEGEBENEN PRODUKTIONSPLANUNGSMODELLE

Es kann nicht Aufgabe dieser Arbeit sein, die zur Lösund der aufgezeigten Betriebsmodelle anzuwendenden Verfahren aus dem Bereich des Operations Research geschlossen darzustellen. Diese Methoden sind hinreichend bekannt und deren Kenntnis kann daher vorausgesetzt werden. In diesem Abschnitt sollen deshalb nur die grundsätzlichen Ansätze derjenigen Verfahren dargestellt werden, die bei der Lösung der angegebenen Modelle zur Anwendung kommen können. Im übrigen kann nur auf die Quellen und die weiterführenden und zusammenfassenden Lehrbücher hingewiesen werden.

Ganz allgemein lassen sich alle Programmierungsaufgaben auf das "General-Programming-Problem" [1] zurückführen:

1) Vgl. Saaty, T., Mathematical Methods of Operations Research, New York 1959, S. 135.

Es sind die Extremwerte (Maxima oder Minima) einer Zielfunktion

$$f(x_1, x_2, \ldots, x_m)$$

zu suchen unter den Nebenbedingungen

$$g_i(x_1, x_2, \ldots, x_m) \gtreqless d_i \quad (i = 1, 2, \ldots, n)$$
$$x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \ldots, m)$$

wobei die d_i konstante Werte sein sollen.

Treten in f und in g_i nur Elemente auf, die in x linear sind, so spricht man von Linearer Programmierung. Existieren demgegenüber in f oder/und g_i ein oder mehrere in x nichtlineare Elemente, so werden alle Rechenverfahren, die zur Lösung derartiger Probleme angewandt werden können, unter dem Begriff "Nichtlineare Programmierung" zusammengefaßt.

Die meisten Anwendungen finden Lineare und Nichtlineare Programmierungsverfahren auf statische Probleme. Peters [1] spricht in diesem Zusammenhang von "Statischer Programmierung". Daneben gibt es die "Dynamische Programmierung" [2], die angewandt wird, wenn Entscheidungen zu treffen sind, wo in der Zeit nicht konstante Daten vorliegen, d.h. bei mehrstufigen, in der Zeit verlaufenden Prozessen [3]. Wir haben es in unseren Modellen ausschließlich mit statischen Modellen zu tun.

---

1) Peters, B., a.a.O., S. 102.

2) Die wesentlichen Veröffentlichungen über Dynamische Programmierung finden sich in ausführlicher Darstellung vor allem in folgenden Schriften: Bellman, R., Dynamic Programming, Princeton 1957. - Bellman, R., "Dynamic Programming and the Numerical Solution of Variational Problems", Operations Research, Vol. 5, 1957, S. 277 ff. - Bellman, R., "Some Problems in the Theory of Dynamic Programming", Econometrica, Vol. 22, 1954, S. 37 ff. - Ferschl, F., "Grundlagen des Dynamic Programming", Unternehmensforschung, Operations Research, Band 3, 1959,

Fortsetzung S. 133

Von den gebildeten Modellen sind die Modelle (1a1) bis (1a4) mit den Methoden der ganzzahligen Linearen Programmierung lösbar. Für das Modell (1b3) kommt das Parametrische Lineare Programmieren in Frage. In den Modellen (1b1), (1b2), (2b1), (2b2), (2c1) und (2c2) sind in x nichtlineare Elemente vorhanden. Das bedeutet, daß hier Verfahren der Nichtlienearen Programmierung zur Anwendung kommen.

1. Ganzzahlige Lineare Programmierung

Das Ganzzahlige Lineare Programmieren setzt zunächst die Lösung eines linearen Problems voraus, wobei die Ganzzahligkeitsbedingungen nicht beachtet werden.

Die Lösungsverfahren der Linearen Programmierung [1] bauen auf den Gesetzen der Matrizenrechnung auf [2].

Fortsetzung der Fußnote von S. 132:
S. 70 ff. - Drexfus, S., "Dynamic Programming", in: Ackoff, R.L., (ed.), a.a.O., S. 211 ff. , Arnoff, E.L. und Sengupta, S.S., "Mathematical Programming", in: Ackoff, R.L. (ed.), a.a.O., S. 105 ff, Besonders S. 192.

3) Arnoff, E.L. und Sengupta, S.S., a.a.O., S. 192.

1) Zur Linearen Programmierung siehe besonders: Koopmans, T.C. (ed.) a.a.O., - Dorfman, R., Application of Linear Programming to the Theory of the Firm, Including an Analysis of Monopolistic Firms by Nonlinear Programming, Berkeley 1951. - Charnes, A., Cooper, W.W. und Henderson, A., An Introduction to Linear Programming, New York 1953. - Rohde, F.V., "Bibliography on Linear Programming", Operations Research, Vol. 5, 1957, S. 45 ff. - Gass, S.I., Linear Programming, New York 1958. - Dorfman, R., Samuelson, P.A. und Solow, R.M., Linear Programming and Economic Analysis, New York-Toronto-London 1958. - Krelle, W. und Künzi, H.P., Lineare Programmierung, Zürich 1958. - Angermann, A., "Linear Programming", in: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Stuttgart-Tübingen-Göttingen, 1959, Band 6, S. 611 ff. - Beckman, M.J., Lineare Planungsrechnung, Ludwigshafen 1959. - Danø , S., Linear Programming in Industry, Theory and Applications, Wien 1960. - Charnes, A, Cooper, W.W., Management Models and Industrial Applications of Linear Programming, New York-London 1961. - Kromphardt, W., Henn, R. und Förstner, K., Lineare Entscheidungsmodelle, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1962. - Joksch, H.C., Lineares Programmieren, Tübingen 1962.

Fortsetzung S. 134

Darauf aufbauend hat Dantzig [1] im Jahr 1947 die Simplex-Methode entwickelt [2]. Rechengang [3] und Ziel der Simplex-Methode werden hier als bekannt vorausgesetzt. Auch auf Sonderfälle, wie die der Degeneration [4] und die Problematik der Dualität [5] soll hier nicht eingegangen werden, da diese hinlänglich bekannt sind.

Fortsetzung Fußnote von S. 133:
2) Eine Einführung in die für das Lineare Programmieren erforderliche Matrizenrechnung geben Krelle und Künzi als einführendes Kapitel. Krelle, W. und Künzi,H.P., a.a.O., S. 14 ff. - Vgl. Zurmühl, R., Matrizen - Eine Darstellung für Ingenieure, 2. Auflage, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1958. - Zurmühl, R., Matrizen und ihre tedhnischen Anwendungen, 3. Auflage, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1961. - Adam, A. (Hrsg.), Anwendung der Matrizenrechnung auf wirtschaftliche und statistische Probleme, Würzburg 1959.

1) Dantzig, G.B., "Maximization of a Linear Function of Variables Subject to Linear Inequalities", Chapter XXI in: Koopmans, T.C. (ed.), a.a.O., S. 339 ff.

2) Zur Bezeichnung als Simplex-Methode vgl.: Vajda, S., The Theory of Games and Linear Programming, London 1956, S. 36. - Krelle, W. und Künzi, H.P., a.a.O., S. 27, Fußnote 1. - Ferschl, F., "Simplex-Methode", Unternehmensforschung - Operations Research, Band 3, 1959, S. 88 ff.

3) Zu den Auswahlkriterien siehe besonders: Dantzig, G.B., "Maximization ...", a.a.O., S.229 ff. - Charnes, A., Cooper, W.W. und Henderson, A., a.a.O., S. 41 ff. - Sasiene, M., Yaspan, A. und Friedman, L., a.a.O., S. 227. - Ferschl, F., "Ein Rechenblatt für die Simplex-Methode", Unternehmensforschung - Operations Research, Band 5, 1961, S. 32 ff. - Charnes, A. und Cooper, W.W., Management Models ..., a.a.O., S. 132.

4) Vgl. Charnes, A., Cooper, W.W. und Henderson, A., a.a.O., S. 62. - Krelle, W. und Künzi, H.P., a.a.O., S. 29 ff., S. 49 und S. 75 ff. - Charnes, A. und Cooper, W.W., Management Models ..., a.a.O., S. 52 ff. - Charnes, A., "Optimality and Degeneracy in Linear Programming", Econometrica, Vol. 20, 1952, S. 160 ff. - Dantzig, G.B., "Application of the Simplex-Method to a Transportation Problem", in: Koopmans, T.C. (ed.), a.a.O., S. 365 f. - Finkel, H., "Die Entartung linearer Planungsaufgaben", Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 30, 1960, S. 223 ff.

5) Vgl. Lemke, C.E., "The Dual Method for Solving the Linear Programming Problem", Naval Research Logostics Quarterly, Vol. 1, No. 1, 1954, S. 36 ff.

Ist auf Grund der Linearen Programmierungaaufgabe mittels des Simplex-Verfahrens eine optimale Lösung gefunden worden, so wird nach einer in x_j^k ganzzahligen Lösung gesucht, wofür sich besonders das von Gomory entwickelte Verfahren eignet [1]. Dies gilt zunächst nur für den Fall, daß alle Variablen ganzzahlig sein müssen. Ist dies nicht erforderlich, so kommen modifizierte Verfahren zur Anwendung, die von Gomory [2], Beale [3], Markowitz und Manne [4] und Land und Doig [5] entwickelt worden sind. Die Darstellung der Verfahren an dieser Stelle erscheint nicht erforderlich, so daß die allgemeinen Bemerkungen und die Hinweise auf die Literatur genügen.

---

1) Gomory, R.E., "Outline of an Algorithm for Integer Solutions to Linear Programming", Bulletin of the American Mathematical Society, Vol. 64, 1958, S.275 - 278. - Gomory, R.E., "An Algorithm für Integer Solutions to Linear Programs", Princeton - IBM Mathematics Research Project, Technical Report No. 1, 1958. - Gomory, R.E., und Baumol, W.J., "Integer Programming and Pricing", Econometrica, Vol. 28, 1960, S. 521 ff. - Terebesi, M., "Bemerkungen zum Verfahren von Gomory zur Bestimmung ganzzahliger Lösungen von Linearen Programmen", Unternehmensforschung - Operations Research, Band 5, 1961, S. 197 ff.

2) Gomory, R.E., "An Algorithm for the Mixed Integer Problem", The RAND-Corporation Paper P - 1885, Februar 1960. - Vgl. Dinkelbach, W. und Steffens, F., "Gemischt ganzzahlige Programme zur Lösung gewisser Entscheidungsprobleme", Unternehmensforschung - Operations Research, Band 5, 1961, S. 3 ff. - Dantzig, G.B., "On the Significance of Solving Linear Programming Problems with Some Integer Variables", Econometrica, Vol. 28, 1960, S. 30 ff. - Dantzig, G.B. , "Disdrete-Variable Extremum Problems", Operations Research, Vol. 5, 1957, S. 266 ff. - Vajda, S., Mathematical Programming, Reading,Mass.,- London 1961. -

3) Beale, E.M.L., "A Method of Solving Linear Programming Problems when Some but not all of the Variables must Take Integral Values", Statistical Techniques Research Group, Princeton, July 1958.

4) Markowitz, H.M. und Manne, A.S., "On the Solution of Discrete Programming Problems", Econometrica, Vol.25, 1957, S. 84 ff.

5) Land, A.H. und Doig, A.G., "An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems", Econometrica, Vol. 28, 1960, S. 497 ff.

2. Parametrisches Lineares Programmieren

Wenn die Koeffizienten eines Systems innerhalb der Linearen Programmierung variieren können, wie es beim Modell (1b1) der Fall ist, so ist die Parametrische Lineare Programmierung das zur Lösung des Systems anzuwendende Verfahren [1]. Dabei können die technischen Bedingungen, die Beschränkungen oder die Koeffizienten der Zielfunktion variable Faktoren sein und entsprechend diesen Fällen sind dann auch die Verfahren. Dabei handelt es sich nicht um eigentliche Lösungsverfahren. Zunächst wird mit Hilfe der Simplex-Methode eine Lösung für das Problem gesucht, und anschließend prüft man, wie sich diese Optimallösung ändert bei Variation der Faktoren.

3. Nichtlineare Programmierung

Die Verfahren der Nichtlinearen Programmierung, mit welchen die Modelle (1b1), (1b2), (2b1), (2b2), (2c1) und (2c2) zu lösen sind, können nicht auf so allgemeine Verfahren zurückgeführt werden, wie es bei der Linearen Programmierung möglich ist. Hier kommt es auf den funktionalen Zusammenhang an, welche Verfahren im einzelnen anwendbar sind. Wichtige Ansatzpunkte für die hier zur Anwendung kommenden Lösungsverfahren finden sich in der Arbeit von Peters [2], wo analoge Probleme wie die in dieser Untersuchung herausgearbeiteten auftreten und Lösungsverfahren angegeben werden. Weitere wichtige Ansatzpunkte für die Lösung der hier auftretenden nichtlinearen Programmierungsaufgaben gehen

1) Vgl. Saaty, T.L., "The Computational Algorithm for the Parametric Objective Function", Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 2, 1955. - Gass, S.I., a.a.O., S. 109 ff. - Jensch, H.C., a.a.O., S. 101 ff. - Vajda, S., Mathematical Programming, a.a.O., S. 187 ff.

2) Peters, B., a.a.O., S. 101 ff.

zurück auf die Arbeiten von Kuhn und Tucker [1] und sind später erweitert und ausgebaut worden [2]. Auf die Unterschiede und Einzelheiten dieser Grundlagen und Verfahren soll hier nicht eingegangen werden. Zu diesem Zweck wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

1) Kuhn, H.W. und Tucker, A.W. (eds.), Linear Inequalities and Related Systems, Annales of Mathematics Studies 38, Princeton 1956. - Kuhn, H.W. und Tucker, A.W., "Nonlinear Programming", in: Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley, 1951, S. 481 ff.

2) Vgl. Frisch, R., Principles of Linear Programming with Particular Reference to the Double Gradient Form of the Logarithmic Potential Method, Memorandum fra Universitetets Socialøkonomiske Institutt, Oslo 1954. - Arrow, K.J., Hurwicz, L. und Uzawa, H. , Studies in Linear and Non-linear Programming, Stanford 1958. - Böhm, H.H., Nichtlineare Programmplanung, Wiesbaden 1959. - Künzi, H.P., Krelle, W. und Oettli, W. , Nichtlineare Programmierung, in: Monographien zur Unternehmensforschung, Band 1, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1962.

Schluß

In der vorliegenden Arbeit ist der Versuch unternommen worden, Modelle für die Produktionsplanung eines speziellen Falles der Chargenproduktion darzustellen, und Ansätze für deren Lösung aufzuzeigen.

Die einander widerstrebenden Ziele - möglichst weitgehende Annäherung an praktische Fälle einerseits, Darstellung der allen Chargenproduktionen gemeinsamen typischen Datenkonstellationen andererseits - zwangen zu einem Kompromiß. Wir haben versucht, an speziellen Beispielen aus dem Stahlwerksbetrieb aufzuzeigen, wo in diesem Industriebereich die von uns als charakteristisch erkannten Daten erscheinen. Dabei konnte keine kasuistische Vollständigkeit erreicht werden. Je nachdem, in welcher Form diese Daten auftreten, wurden dann entsprechende Modelle gebildet. Diese wiederum sind durchweg recht allgemein gehalten, damit die Anwendbarkeit auf andere Fälle der Chargenproduktion nicht unmittelbar eingeschränkt wird.

Wenn es uns gelungen ist, Hinweise zu geben, wie Produktionsplanungen im angegebenen Bereich, die modernen Ansprüchen genügen, durchzuführen sind, so ist die Absicht dieser Arbeit erreicht.

LITERATURVERZEICHNIS

1. Ackoff, R.L. (ed.): Progress in Operations Research, Volume I, New York-London 1961.
2. Ackoff, R.L.: "The Development of Operations Research as a Science", Operations Research, Vol. 4, 1956, S. 265 ff.
3. Adam, A. (Hrsg.): Anwendung der Matrizenrechnung auf wirtschaftliche und statistische Probleme, Würzburg 1959.
4. Akers, S.B. und Friedman, J.: "A Non-Numerical Approach to Production Scheduling Problems", Operations Research, Vol. 3, 1955, S. 429 ff.
5. Alford, L.P. und Bangs, J.R. (eds.): Production Handbook, New York 1954.
6. Angermann, A.: Gleichgewichtskalkulation, Meisenheim 1952.
7. Angermann, A.: "Linear Programming", in: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Stuttgart-Tübingen-Göttingen 1959, Band 6,S. 611 ff.
8. Arnoss, E.L. und Sengupta, S.S.: "Mathematical Programming", in: Ackoff, R.L. (ed.): Progress in Operations Research, Volume I, New York-London 1961, Chapter 4, S. 105 ff.
9. Arrow, J.K., Harris, T. und Marshak, J.: "Optimal Inventory Policy", Econometrica, Vol. 19, 1951, S. 250 ff.
10. Arrow, J.K., Hurwicz, L. und Uzawa, H.: Studies in Linear and Non-linear Programming, Stanford 1958.
11. Ballendat, K.: "Plankosten im Stahlwerk", Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 24, 1954, S. 336 ff. und S 407 ff.
12. Beale, E.M.L.: "A Method of Solving Linear Programming Problems when Some but not All of the Variables must Take Integral Values", Statistical Techniques Research Group, Section of Mathematical Statistics, Department of Statistics, Princeton University, Technical Report No. 19, July 1958.
13. Beckmann, M.J.: Lineare Planungsrechnung, Ludwigshafen 1959.
14. Beckmann, M.J.: "Über einige Methoden des Operations Research", Zeitschrift für die Gesamte - Staatswissenschaft, Band 114, 1958, S. 396 ff.

15. Bellman, R.: Dynamic Programming, Princeton 1957.

16. Bellman, R.: "Dynamic Programming and the Numerical Solution of Variational Problems", Operations Research, Vol. 5, 1957, S. 277 ff.

17. Bellman, R.: "Some Problems in the Theory of Dynamic Programming", Econometrica, Vol. 22, 1954, S. 37 ff.

18. Benteler, K.: "Entwicklung des Stranggießens von Stahl zum unmittelbaren Auswalzen von Warmband", Stahl und Eisen, Jg. 82, 1962, S. 597 ff.

19. Beste, T.: "Der Stand der betrieblichen Planung", Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, Jg. 36, 1942, S. 117 ff. und S. 714 ff.

20. Bierfelder, W.: Wege und Irrwege mathematischen Denkens in Wirtschaftstheorie und Unternehmenspolitik, Nürnberg 1958.

21. Böhm, H.H.: "Die Wertzurechnung der nichtlinearen Programmplanung", Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 29, 1959, S. 129 ff, S. 232 ff. und S. 288 ff.

22. Böhm, H.H.: Nichtlineare Programmplanung, Wiesbaden 1959.

23. Böhm, H.H. und Wille, F.: Direct Costing und Programmplanung, München 1960.

24. Bowman, E.H.: "Assembly-Line Balancing by Linear Programming", Operations Research, Vol. 8, 1960, S. 385 ff.

25. Bowman, E.H.: "The Schedule-Sequencing Problem", Operations Research, Vol. 7, 1959, S. 621 ff.

26. Castan, E.: "Wirtschaftlichkeit und Wirtschaftlichkeitsrechnung", in: Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, 3. Auflage, Band 4, 1962, Spalte 6366 ff.

27. Charnes, A.: "Optimality and Degeneracy in Linear Programming", Econometrica, Vol. 20, 1952, S. 160 ff.

28. Charnes, A. und Cooper, W.W.: Management Models and Industrial Applications of Linear Programming, Volume I und II, New York-London 1961.

29. Charnes, A., Cooper, W.W. und Henderson, A.: "An Introduction to Linear Programming, New York 1953.

30. Churchman, C.W., Ackoff, R.L. und Arnoff, E.L.: Introduction to Operations Research, New York 1957. Deutsche Übersetzung: Operations Research. Eine Einführung in die Unternehmensforschung, Wien-München 1961.

31. Danø, S.: Linear Programming in Industry, Wien 1960.

32. Dantzig, G.B.: "Application of the Simplex-Method to a Transportation Problem", in: Koopmans, T.C. (ed.), Activity Analysis of Production and Allocation, New York 1951, Chapter XXIII, S. 359 ff.

33. Dantzig, G.B.: "Discrete-Variable Extremum Problems", Operations Reseaarch, Vol. 5, 1957, S. 266 ff.

34. Dantzig, G.B.: "Maximization of a Linear Function of Variables Subject to Linear Ineuqalities", in: Koopmans, T.C. (ed.), Activity Analysis of Production and Allocation, New York 1951, Chapter XXI, S. 339 ff.

35. Dantzig, G.B.: "On the Significance of Solving Linear Programming Problems with Some Integer Variables", Econometrica, Vol. 28, 1960, S. 30 ff.

36. Defossez, P.: "Ausblicke auf die Herstellung von Brammen im Stranggießverfahren für Breitband- und Grobblechwalzwerke", Stahl und Eisen, Jg. 82, 1962, S. 1496 ff.

37. Dinkelbach, W. und Steffens, F.: "Gemischt ganzzahlige lineare Programme zur Lösung gewisser Entscheidungsprobleme", Unternehmensforschung-Operations Research, Band 5, 1961, S. 3 ff.

38. Dorfman, R.: Application of Linear Programming to the Theory of the Firm, Including an Analysis of Monopolistic Firms by Nonlinear Programming, Berkeley 1951.

39. Dorfman, R., Samuelson, P.A. und Solow, R.M.: Linear Programming and Economic Analysis, New-York-Toronto-London 1958.

40. Dreyfus, S.: "Dynamic Programming", in: Ackoff, R.L. (ed.), Progress in Operations Research, Volume I, New York-London 1961, Chapter 5, S. 211 ff.

41. Drucker, P.F.: Die Praxis des Management, Düsseldorf 1956.

42. Eichel, K.: Das basische Windfrischverfahren, Berlin 1952.

43. Ellinger, T.: Ablaufplanung. Grundlagen der Planung des zeitlichen Ablaufs der Fertigung im Rahmen der industriellen Produktionsplanung, Stuttgart 1959.

44. Elmaghraby, S.E.: "An Approach to Linear Programming under Uncertainty", Operations Research, Vol. 5, 1959, S. 208 ff.

45. Fabian, T.: "A Linear Programming Model of Integrated Iron and Steel Production", Management Science, Vol. 4, 1958, S. 415 ff.

46. Ferschl, F.: "Ein Rechenblatt für die Simplex-Methode", Unternehmensforschung-Operations Research, Band 5, 1961, S. 32 ff.

47. Ferschl, F.: "Grundlagen des Dynamic Programming", Unternehmensforschung-Operations Research, Band 3, 1959, S. 70 ff.

48. Ferschl, F.: "Simplex-Methode", Unternehmensforschung-Operations Research, Band 3, 1959, S. 88 ff.

49. Förstner, K.: "Bemerkungen zur Wirtschaftsmechanik", Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 29, 1959, S. 38 ff.

50. Förstner, K. und Henn, R.: Dynamische Produktionstheorie und Lineare Programmierung, Meisenheim 1957.

51. Frisch, R.: "Principles of Linear Programming with Particular Reference to the Double Gradient Form of the Logarithmic Potential Method", Memorandum fra Universitetets Socialøkonomiske Institutt, Oslo 1954.

52. Gass, S.I.: Linear Programming, New York 1958.

53. Gass, S.I. und Saaty, T.L.: "The Computational Algorithm for the Parametric Objective Function", Naval Research Logostics Quarterly, Vol. 2, 1955.

54. Giffler, B. und Thompson, G.L.: "Algorithms for Solvind Production-Scheduling Problems", Operations Research, Vol. 8, 1960, S. 487 ff.

55. Gomory, R.E.: "An Algorithm for Integer Solutions to Linear Programs", Princeton-IBM Mathematics Research Project, Technical Report No. 1, 1958.

56. Gomory, R.E.: "An Algorithm for the Mixed Integer Problem", The RAND Corporation Paper P - 1885, February 1960.

57. Gomory, R.E.: "Outline of an Algorithm for Integer Solutions to Linear Programming", Buuletin of the American Mathematical Society, Vol. 64, 1958, S. 275 ff.

58. Gomory, R.E. und Baumol, W.J.: "Integer Programming and Pricing", Econometrica, Vol. 28, 1960, S. 521 ff.

59. Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Band I, Die Produktion, 5. Auflage, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1960.
Band II, Der Absatz, 3. Auflage, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1959.

60. Gutenberg, E.: "Planung im Betrieb", Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 22, 1952, S. 669 ff.

61. Haertel, R.: "Methoden des Operations Research in der Industrie", Informationstagung in St. Gallen, Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 30, 1960, S. 225 ff.

62. Hall, R.: Das Rechnen mit Einflußgrößen im Stahlwerk, Köln-Opladen 1959.

63. Harling, J.: "Simulation Techniquesin Operations Research - A Review", Operations Research, Vol. 6, 1958, S. 307 ff.

64. Hennig, K.W.: "Betriebswirtschaftslehre der industriellen Erzeugung", in: Die Wirtschaftswissenschaften, Wiesbaden 1960.

65. Johnson, S.M.: "Optimal Two- and Three-Stage Production Scheduling with Setup Times Included", Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 1, No. 1, 1954, S. 61 ff.

66. Johnson, S.M.: "Sequential Production Planning over Time at Minimum Cost", Management Science, Vol, 3, 1957, S. 435 ff.

67. Joksch, H.C.: Lineares Programmieren, Tübingen 1962.

68. Kalveram, W.: Industriebetriebslehre, 7. Auflage, Wiesbaden 1960.

69. Kantorovich, L.V.: "Mathematical Methods of Organizing and Planning Productinn", Management Science, Vol. 6, 1960, S. 366 ff.

70. Kilger, W.: "Produktions- und Kostentheorie", in: Die Wirtschaftswissenschaften, Wiesbaden 1958.

71. Koch, H.: "Betriebliche Planung", in: Die Wirtschaftswissenschaften, Wiesbaden 1961.

72. Koopmans, T.C. (ed.): Activity Analysis of Production and Allocation, Cowles Commission Monograph No. 13, New York 1951.

73. Krelle, W.: Preistheorie, Tübingen-Zürich 1961.

74. Krelle, W. und Künzi, H.P.: Lineare Programmierung, Zürich 1958.

75. Kromphardt, W., Henn, R. und Förstner, K.: Lineare Entscheidungsmodelle, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1962.

76. Künzi, H.P., Krelle, W. und Oettli, W.: Nichtlineare Programmierung, in: Monographien zur Unternehmensforschung, Band 1, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1962.

77. Kuhn, H.W. und Tucker, A.W.(eds.): "Linear Inequalities and Related Systems", Annales of Mathematics Studies 38, Princeton 1956.

78. Kuhn, H.W. und Tucker, A.W.: "Nonlinear Programming", in: Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley 1951, S. 481 ff.

79. Land, A.H. und Doig, A.G.: "An Automatic Method of Solving Discrete Origramming Problems", Econometrica, Vol. 28, 1960, S. 497 ff.

80. Lehmann, M.R.: Industriekalkulation, 2. Auflage, Stuttgart 1941.

81. Lemke, C.E.: "The Dual Method of Solving the Linear Programming Problem", Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 1, No. 1, 1954, S. 36 ff.

82. Leontief, W.W.: "Quantitative Input and Output Relations in the Economic System of the United States", Review of Economic Statistics, Vol. 18, 1936, S. 105 ff.

83. Littmann, H.-E.: "Stahlwerk", in: Handwörterbuch der Betriebswirtschaftslehre, 3. Band, 1960, Spalte 5024 ff.

84. McCloskey, J.M. und Trefethen, F.V. (eds.): Operations Research for Management, Baltimore 1956.

85. Magee, J.F.: Production Planning and Inventory Control, New York-Toronot-London 1958.

86. Manne, A.S.: "A Note on the Modigliani-Hohn Production Smoothing Problem", Management Science, Vol. 3, 1957, S. 371 ff.

87. Markowitz, H.M. und Manne, A.S.: "On the Solution of Discrete Programming Problems", Econometrica, Vol. 25, 1957, S. 84 ff.

88. Mellerowicz, K.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 10. Auflage, Berlin 1959.

89. Mellerowicz, K.: Betriebswirtschaftslehre der Industrie, 3. Auflage, Freiburg 1958.

90. Mellerowicz, K.: Kosten und Kostenrechnung, 2. Auflage, Berlin 1951. - 3. Auflage, Berlin 1957.

91. Mellerowicz, K.: Planung und Plankostenrechnung, Band 1, Freiburg 1961.

92. Modigliani, F. und Hohn, F.E.: "Production Planning over Time and the Nature of the Expectation and Planning Horizon", Econometrica, Vol. 23, 1955, S. 46 ff.

93. Morgenthaler, G.W.: "The Theory and Application of Simulation in Operations Research", In: Ackoff, R.L. (ed.): Progress in Operations Research, Volume I, New York-London 1961, Chapter 9, S. 369 ff.

94. Moss, J.H.: "Commentary on Harling's 'Simulation Techniques in Operations Research", Operations Research, Vol. 6, 1958, S. 591 ff.

95. Naddor, E.: "Some Models of Inventory and an Application", Management Science, Vol. 2, 1955/56, S. 299 ff.

96. Nelson, R.T.: "Waiting-Time Distributions for Application to Series of Service Centers", Operations Research, Vol. 6, 1958, S. 856 ff.

97. Neumann, J.v. und Morgenstern, O.: Theory of Games and Economic Behavior, Princeton 1944. Deutsche Übersetzung: Spieltheorie und wirtschaftliches Verhalten, Würzburg 1961.

98. Paulsson Frenckner, T.: "Betriebswirtschaftslehre und Verfahrensforschung", Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, N.F. Jg. 9, 1957, S. 65 ff.

99. Peters, B.: Die Bestimmung der Optimalen Losgröße. Eine Anwendung der Nichtlinearen Programmierung, Dissertation, Göttingen 1961.

100. Riebel, P.: "Kostengestaltung bei chargenweiser Produktion", in: Schulz, C.E.: Der Industriebetrieb und sein Rechnungswesen, Wiesbaden 1956, S. 138 ff.

101. Riedelbauch, H.: "Partie- und Chargenfertigung in betriebswirtschaftlicher Sicht", Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, N.F. Jg. 9, 1957, S. 532 ff.

102. Rjabinki, B.J.: Die Planung der Produktion in Hüttenwerken, Band 1, Berlin 1955 (Übersetzung aus dem Russischen).

103. RKW-Auslandsdienst, Ablauf- und Planungsforschung, Heft 5, München 1958.

104. RKW-Auslandsdienst: Arbeitsvorbereitung, Fertigungsplanung und Fertigungssteuerung in USA, Heft 63, München 1959.

105. Rohde, F.V.: "Bibliography on Linear Programming", Operations Research, Vol. 5, 1=57, S. 45 ff.

106. Rowe, A.J. und Jackson, J.H.: "Research Problems in Production Routing and Scheduling", Journal of Industrial Engineering, Vol. III, 1956, S. 116 ff.

107. Rummel, K.: Einheitliche Kostenrechnung, 3. Auflage, Düsseldorf 1949.

108. Rummel, K.: Grundlagen der Selbstkostenrechnung, Düsseldorf 1934.

109. Saaty, T.L.: Mathematical Methods of Operations Research, New York 1959.

110. Sagoroff, S.: "Operations Research", in: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Band 8, Stuzzgart-Tübingen-Göttingen 1959, S. 96 ff.

111. Salveson, M.E.: "On a Quantitative Method in Production Planning and Scheduling", Econometrica, Vol. 20, 1952, S. 554 ff.

112. Sasieni, M., Yaspan, A. und Friedman, L.: Operations Research, Methods and Problems, New York 1959.

113. Schäfer, E.: "Losgröße und Kostengestaltung", Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 8, 1931, S. 824 ff.

114. Schäfer, E.: "Marktforschung", in: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Stuttgart-Tübingen-Göttingen, Band 7, 1961, S. 147 ff.

115. Schneider, E.: Einführung in die Wirtschaftstheorie, II. Teil, 7. Auflage, Tübingen 1961.

116. Schulz, C.E.(Hrsg.): Der Industriebetrieb und sein Rechnungswesen, Wiesbaden 1956.

117. Sisson, R.L.: "Methods of Sequencing in Job-Shops - A Review", Operations Research, Vol. 7, 1959, S. 10 ff.

118. Sisson, R.L.: "Sequencing Theory", in: Ackoff, R.L. (ed.): Progress in Operations Research, Volume I, New York-London 1961, Chapter 7, S. 293 ff.

119. Stackelberg, H.v.: Grundlagen der theoretischen Volkswirtschaftslehre, 2. Auflage, Tübingen-Zürich 1951.

120. Steffen, M. und Steinecke, V.: "Einflußgrößenrechnung zur Kostenplanung in einem kontinuierlichen Feinstahlwalzwerk mit Matrizen", Stahl und Eisen, Jg. 82, 1962, S. 155 ff.

121. Sundhoff, E.: Grundlagen der Technik der Beschaffung von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen, Essen 1958.

122. Szwarc, W.: "Solutions of the Akers-Friedman Scheduling Problem", Operations Research, Vol. 8, 1960, S. 782 ff.

123. Terebesi, M.: "Bemerkungen zum Verfahren von Gomory zur Bestimmung ganzzahliger Lösungen von linearen Programmen", Unternehmensforschung-Operations Research, Band 5, 1961, S. 197 ff.

124. Tocher, K.D.: "An Integrated Project for the Design and Appraisal of Mechanized Decision-Making Control Systems", Operational Research Quarterly, Vol. 11, 1960, S. 50 ff.

125. Trefethen, F.N.: "A History of Operations Research", In: McCloskey, J.M. und Trefethen, F.N.: Operations Research for Management, Baltimore 1956.

126. Trubin, M.G.: Der Siemens-Martin-Prozeß, Moskau 1951. Deutsche Übersetzung: Berlin 1953.

127. Vajda, S.: Einführung in die Linearplanung und die Theorie der Spiele, München 1961.

128. Vajda, S.: Mathematical Programming, Reading, Mass.-London 1961.

129. Vajda, S.: The Theory of Games and Linear Programming, London 1956.
Deutsche Übersetzung: Theorie der Spiele und Linearprogrammierung, Berlin 1962.

130. Vazsonyi, A.: Scientific Programming in Business and Industry, New York 1958.

131. Voß, H.: "Die Kostenplanung bei schwankendem Umsatzprozeß in Papierfabriken", Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, Jg. 25, 1931, S. 40 ff.

132. Wartmann, R., Kopineck, H.J. und Hanisch, W.: "Funktionales Arbeiten in Kostenrechnung und Planung mit Hilfe von Matrizen", Archiv für das Eisenhüttenwesen, Jg. 31, 1960, S. 441 ff.

133. Winkel, H.: "Die Entartung linearer Planungsaufgaben", Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 30, 1960, S. 223 ff.

134. Wöhe, G.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Berlin-Frankfurt 1960.

135. Wolter, A.M.: "Das Problem der Wirtschaftlichkeit bei der Industriellen Sortenproduktion", Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, Jg. 31, 1937, S. 389 ff.

136. Zurmühl, R.: Matrizen - Eine Darstellung für Ingenieure, 3. Auflage, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1961.

137. Zurmühl, R.: Matrizen und ihre technischen Anwendungen, 3. Auflage, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1961.

LEBENSLAUF

Am 31. 7. 1933 wurde ich, Werner Hermann S c h u l t z, als Sohn des Bankbeamten Leonhard Schultz und dessen Ehefrau Else, geb. Freiberg, in Libau/Lettland geboren. Nach der Umsiedlung im Jahre 1939 besuchte ich die Volksschule in Lissa/Warthegau, danach die Oberschulen in Lissa/Warthegau, Hof/Saale, Sulzbach-Rosenberg und Amberg/Oberpfalz, wo ich im Sommer 1952 die Reifeprüfung ablegte. Im Sommersemester 1954 wurde ich als Student der Eisenhüttenkunde an der Bergakademie Clausthal-Zellerfeld immatrikuliert. Im Sommersemester 1957 war ich als Austauschstudent an der Technischen Universität in Berlin. Im Februar 1959 legte ich an der Bergakademie Clausthal-Zellerfeld meine Diplomprüfung in der Fachrichtung Eisenhüttenkunde ab. Die Diplomarbeit dazu hatte das Thema:

> "Festlegung des günstigsten FeO-Gehaltes der Schlacke vor dem Abstechen für verschiedene Stahlqualitäten und Bestimmung der zulässigen Grenzen des FeO-Gehaltes".

Im Sommersemester 1959 begann ich ein Studium der Betriebswirtschaftslehre an der Georg-August-Universität zu Göttingen. Bis zum Mai 1963 war ich dort voll immatrikuliert. In dieser Zeit begann ich mit der Anfertigung vorliegender Dissertation. Seit Mai 1963 bin ich in der Industrie tätig.

Am 10. 7. 1964 legte ich vor der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität das Rigorosum im Rahmen des Promotionsverfahrens ab.